

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Институт космических и информационных технологий  
Базовая кафедра геоинформационных систем

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ В. И. Харук  
подпись

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

03.03.02. - Информационные системы и технологии

Определение характеристик хвойных древостоев по данным аэрофотосъемки с  
БПЛА на примере географических культур лиственницы

Руководитель	_____	доцент, канд. техн. наук	Рубцов А. В.
	подпись    дата		
Выпускник	_____		Семенюк Я. В.
	подпись    дата		
Нормоконтролер	_____		Федотова Е. В.
	подпись    дата		

Красноярск 2018

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Определение характеристик хвойных древостоев по данным аэрофотосъемки с БПЛА на примере географических культур лиственницы» содержит 60 страниц, 24 иллюстраций, 4 таблицы, 3 приложения, 30 использованных источников.

Перечень ключевых слов: климатипы лиственницы, БПЛА, спектральные камеры, ортофотомозика, вегетационные индексы, инвентаризация, фенологические фазы.

Целью данной работы является статистический анализ взаимосвязей морфометрических показателей географических культур (климатипов) лиственницы и различий их фенологических циклов по данным наземной инвентаризации и аэрофотосъемки с БПЛА.

Основные задачи:

- расчет и анализ площадных характеристик крон деревьев и дополнение базы данных инвентаризации географических культур лиственницы;
- расчет и анализ основных вегетационных индексов по данным аэрофотосъемки;
- расчет аллометрических уравнений по морфометрическим показателям исследуемых климатипов;
- анализ различия фенологических фаз географических культур лиственницы на пробной площади по картам вегетационных индексов

В данной работе показано, что существуют различия в развитии вегетационного периода у видов лиственницы с разных мест происхождения, растущие на пробной площади ОЭП «Погорельский бор». Для изучения динамики из фенологических фаз применялись данные с БПЛА со спектральными камерами.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Исходные данные и методы их получения.....	7
1.1 Объект исследования .....	7
1.2 Инвентаризация пробной площади с помощью комплекса Field-Map.....	9
1.3 Аэрофотосъемка с помощью БПЛА.....	12
1.3.1 Характеристики БПЛА .....	12
1.3.2 Спектральные камеры MAPIR Survey 2 .....	13
1.3.3 Выполнение аэрофотосъемки .....	16
2 Обработка данных аэрофотосъемки.....	17
2.1 Геопривязка изображений .....	18
2.2 Преобразование форматов и калибровка изображений .....	21
2.3 Компоновка ортофотомозаики .....	23
3 Применение вегетационных индексов в анализе фенофаз .....	27
3.1 Фенологические фазы лиственницы .....	27
3.2 Анализ вегетационных индексов.....	30
3.3 Зональная статистика индексов по группам деревьев .....	37
4 Анализ морфометрических показателей.....	41
4.1 Построение аллометрических уравнений.....	41
4.2 Пространственный анализ по видам .....	46
Заключение .....	50
Список использованных источников .....	52
ПРИЛОЖЕНИЕ А Карта пробной площади .....	57
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Перечень происхождения лиственницы.....	58
ПРИЛОЖЕНИЕ В Вегетационные индексы и их применение .....	59

## ВВЕДЕНИЕ

Изменчивость лиственницы сибирской изучается на протяжении длительного времени, как в природных популяциях, так и в искусственных насаждениях [1]. В результате многочисленных исследований учеными из разных стран получены результаты экспериментальных материалов и выводов на тему роста лиственницы в различных местах её обитания, от южных границ её ареала до северных районов с многолетней почвенной мерзлотой. В этой теме особый интерес для изучения изменчивости морфометрических признаков и фенологических фаз лиственницы представляет экспериментальная пробная площадь на территории ОЭП «Погорельский бор» Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, на которой в 1969-1970 гг. под руководством ученого-селекционера А.И. Ирошникова был основан уникальный эксперимент высадки нескольких десятков географических культур (климатипов) лиственницы различных мест происхождения (48 групп лиственницы). В этих географических культурах представлены: лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.) из лесорастительных провинций Саяно-Алтайской горной области и лиственница Гмелина (*L. gmelinii* Rupr.) из Забайкальских и Зейских провинций. В посадках также испытывались отдельные происхождения лиственниц Чекановского (*L. x czekanowskii* Szaf.), Каяндера (*L. kajanderi* Mayr), японской (*L. leptolepis* Gord) и лиственницы Сукачева (*L. sukaczewii* Dybis) [2].

В настоящее время благодаря развитию технологий появились принципиально новые возможности для сбора пространственных данных в лесном хозяйстве с помощью современных электронных измерительных приборов, средств геопозиционирования (GPS-приемники), мобильных геоинформационных систем (ГИС) и дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). К таким средствам относится программно-аппаратный комплекс Field-Map, с помощью которого в 2016 году была произведена инвентаризация исследуемых климатипов лиственниц для определения их нынешних морфометрических показателей и анализа их характеристик роста (составления

аллометрических уравнений). Функции Field-Map позволяют картографировать индивидуальные деревья, измерять их высоту, диаметр ствола на любой высоте и автоматически вычислять объемы стволов деревьев; вычислять площадь древостоев, форму и объем крон деревьев; длины линии, периметры и площади полигонов; проверять достоверность собранной информации и контролировать полноту баз данных во время полевых работ; визуализировать измеренные объекты в трехмерном графическом пространстве; создавать цифровые модели местности, а также решать в полевых условиях множество других задач таксации и инвентаризации, связанных с обработкой баз данных [3].

Данные спутниковой съемки содержат полезную информацию, полученную в различных спектральных диапазонах. Однако разрешения спутниковых данных зачастую не хватает для задач на уровне показателей индивидуальных деревьев в отличие от существующих технологий аэрофотосъемки, которые обладают более высокой точностью и оперативностью. Применение БПЛА особо эффективно, когда необходимо быстро получить точные данные на небольшие по площади территории. Для картирования характеристик географических культур лиственницы были использованы данные съемки пробной площади с БПЛА, оборудованных стандартными камерами в диапазоне съемки RGB и специализированными камерами Mapir Survey 2, включая ближний инфракрасный канал.

В комплексе данные наземной инвентаризации и регулярной аэрофотосъемки пробной площади представляют большой интерес в разработке методов и алгоритмов количественной и качественной оценок древостоев, а также позволяют решать задачи мониторинга в изучении фенологических циклов растительности, в частности листопадных деревьев.

Цель дипломной работы – статистический анализ взаимосвязей морфометрических показателей географических культур лиственницы и различий их фенологических циклов по данным наземной инвентаризации и аэрофотосъемки.

Задачи исследования:

- обзор литературы, методов и программного обеспечения по теме работы, составление плана работы;
- предобработка и систематизация слоев данных аэрофотосъемки сверхвысокого пространственного разрешения с беспилотного летательного аппарата (БПЛА) для пробной площади географических культур (климатипов) лиственницы в ОЭП «Погорельский бор»;
- векторизация контуров крон деревьев пробной площади по данным аэрофотосъемки;
- расчет и анализ площадных характеристик крон деревьев и дополнение базы данных инвентаризации климатипов лиственницы;
- расчет аллометрических уравнений по морфометрическим показателям исследуемых климатипов;
- расчет и анализ основных вегетационных индексов по данным аэрофотосъемки;
- анализ различия фенологических фаз климатипов лиственницы на пробной площади по картам вегетационных индексов.

## 1 Исходные данные и методы их получения

### 1.1 Объект исследования

Уникальный эксперимент был основан в 1969-1970 гг. Географические культуры лиственницы созданы лабораторией лесной генетики и селекции Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН в 1964-1966 гг. на экспериментальной базе института «Погорельский бор» (38 км севернее города Красноярска) под руководством ученого-селекционера А.И. Ирошникова. Данные культуры были высажены в возрасте 3-4 лет в 1969-1970 гг. на площади 1,5 гектар. В этой работе были исследованы характеристики основной пробной площади размерами 110 x 126 м (рис 1).

Опорно-экспедиционный пункт (далее ОЭП) «Погорельский бор» находится на территории Красноярской лесостепи в бассейне р. Бузим, на водоразделе двух ее притоков. Территория ОЭП «Погорельский бор» относится к центральным районам Красноярского края. Климат района резко континентальный со значительными колебаниями температуры по годам, среднегодовая температура воздуха  $-1,3^{\circ}\text{C}$ , среднее количество годовых осадков 410 мм, средняя продолжительность вегетационного периода 149 дней [2].

Почвы супесчаные серые и сильно оподзоленные, реже суглинистые, серые лесные. Грунтовые воды залегают на большой глубине, в связи с чем насаждения в основном используют влагу атмосферных осадков, 70% которых выпадает в теплый период года [1].

В географических культурах представлены виды: лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb., 30 мест происхождения), лиственница Гмелина (*L. gmelinii* Rupr.) пяти видов из лесорастительных провинций Саяно-Алтайской горной области, из Забайкальских и Зейских провинций. В посадках также испытывались отдельные виды лиственниц Чекановского (*L. czekanowskii* Szaf.) (1 место происхождения), Каяндера (*L. cajanderi* Mayr), японской (*L. leptolepis*

Gord) и один вид лиственницы Сукачева (*L. sukaczewii* Dylis). Всего было высажено 48 групп деревьев в неравном количестве на различных по площади смежных секторах, образующих единую пробную площадь (прил. А). Характеристики исследуемых деревьев разных происхождений (климатипов) представлены в таблице 1 (прил. Б), оригинальная схематичная карта посадок изображена в приложении А.



Рисунок 1 – Вид пробной площади географических культур лиственницы в ОЭП «Погорельский бор» (20.09.2016).





Инвентаризация живых деревьев географических культур произведена с помощью программно-инструментального комплекса Field-Map [3] в результате сотрудничества с отделом ГИЛ филиала «ВОСТСИБЛЕСПРОЕКТ» ФГБУ «Рослесинфорг». Комплекс состоит из набора приборов: лазерного дальномера, электронного компаса, инклинометра, GPS приемника, планшетного компьютера, централизованно управляемых ПО ГИС с аналогичным названием (Field-Map) и позволяет решать широкий круг задач лесной отрасли. Инвентаризация включала четыре вида измерений – положение стволов деревьев относительно центра пробной площади с известными координатами, диаметр ствола на высоте 1,3 метра (DBH, от англ. Diameter at Breast Height) в мм, высоту деревьев ( $H_{tree}$ ) в метрах и высоту нижней живой ветки кроны, из которых был рассчитан показатель протяженности кроны каждого дерева ( $L_{crown}$ ) в метрах. Общее количество деревьев лиственницы на пробной площади в итоге инвентаризации 2016 года - 1674 шт.

Программный пакет ГИС Field-Map обладает базовым набором алгоритмов и функций для аналитической пост-обработки полученных данных. Исходные данные были экспортированы в векторный формат shape файлов, позволяющий импортировать их в ГИС (рис. 3).

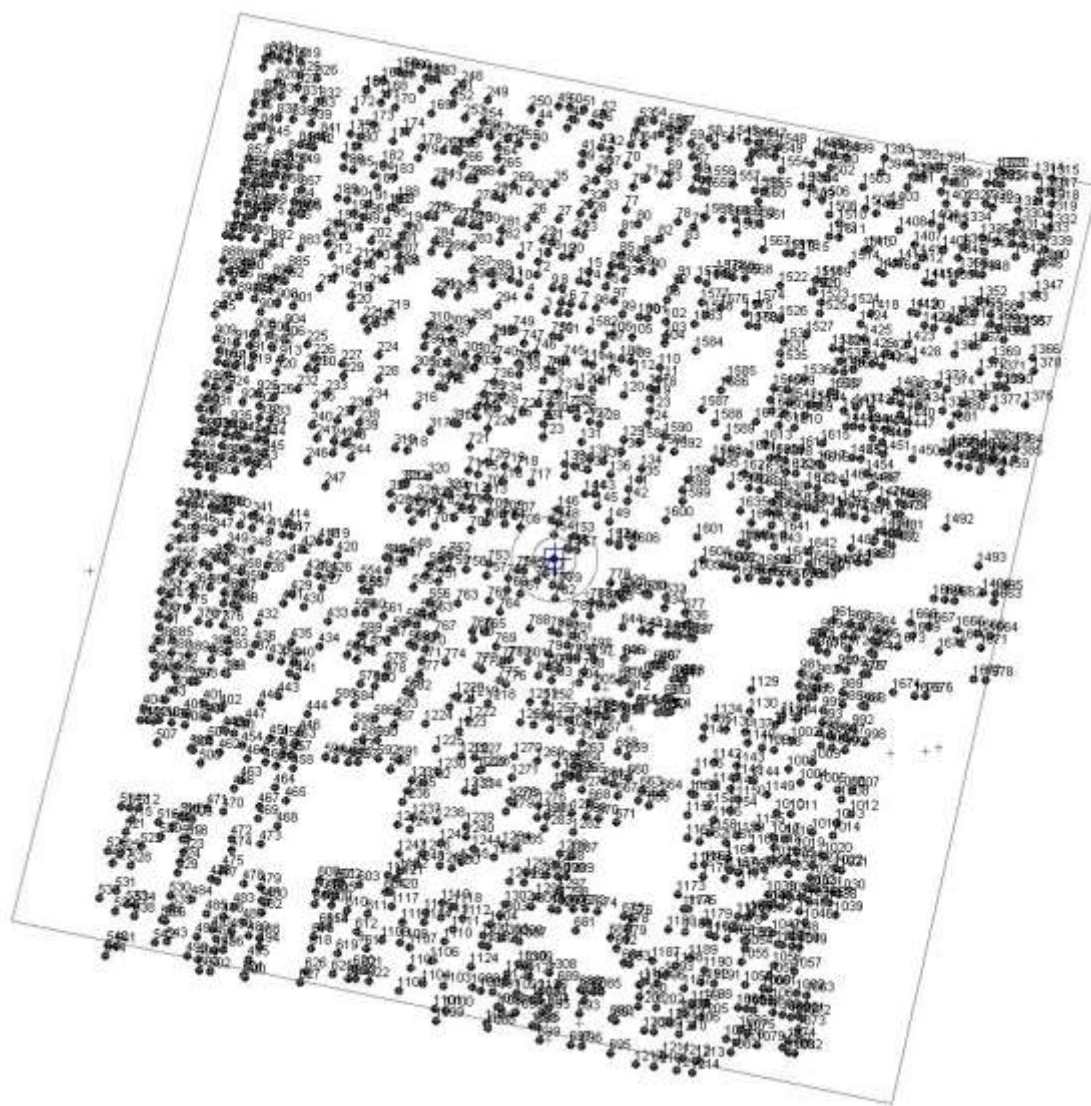


Рисунок 3 – Расположение стволов деревьев климатипов лиственницы на пробной площади по состоянию на 2016 г.

Общее количество деревьев, инвентаризованных в 2016 году с помощью Field-Mar, на пробной площади составило 1674 шт. При этом было выявлено, что некоторые культуры лиственницы погибли, в частности из Казахстана (Маркаколь, Куршим, Зайсан), Томской области (Нарым) и респ. Тыва (Чадан), Также частично погибли (или присутствуют в единичных экземплярах) климотипы из Катунь-Онгудай (Алтайский край), Ангарска (Иркутская область) и Шагонара (Республика Тыва).

### **1.3 Аэрофотосъемка с помощью БПЛА**

Дистанционная съемка пробной площади с целью регистрации и дифференциации индивидуальных особенностей фаз фенологического цикла (фенофаз) климатипов лиственницы выполнялась периодически на малых высотах в вегетационных сезонах в 2016 и 2017 годов с помощью портативных камер на базе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [4]. Съемка в 2016 году проводилась квадрокоптером DJI Phantom 3 Pro со стандартной (штатной) камерой, а в 2017 году гексакоптером Yuneec Typhoon H (рис. 4) с двумя камерами MAPIR Survey 2 (модели NDVI (Red + NIR) и RGB). Съемка проводилась в режиме автопилота БПЛА по заранее запрограммированному маршруту на высоте 200 м с записью снимков в режиме автоспуск затвора камер с задержкой (временным шагом) 3 или 5 секунд. В 2016 году полеты выполнены: 17 мая, 18 августа, 20 сентября и 4 октября. 2017 году было 8 полетов: 11 апреля, 20 апреля, 28 апреля, 13 мая, 19 мая, 13 июля, 25 июля, 29 августа, из которых были отфильтрованы снимки только 5 дат в апреле, июле и августе по факторам их качества (время съемки, результат калибровки, качество ортофотомозаики и т.д.).

#### **1.3.1 Характеристики БПЛА**

Гексакоптер Yuneec Typhoon H – профессиональный роторный БПЛА с шестью винтами, управляемый с дистанционного пульта по радиоканалу, предназначенный для аэрофото и видео съемки. Typhoon H имеет 6 различных режимов полета. Персональная наземная станция ST16 (или пульт управления) БПЛА работает под управлением операционной системы Android, в нем есть несколько органов управления, пара антенн и ЖК дисплей с диагональю в 7 дюймов. Характеристики гексакоптера приведены в таблице 1.



Рисунок 4 – Гексакоптер Yuneec Typhoon H [29]

Таблица 1 – Характеристики гексакоптера Yuneec Typhoon H

Вес дрона (с аккумулятором)	1695 грамм;
Максимальная скорость полёта	до 70 км/ч;
Максимальная высота полета	122 метра - программное ограничение, > 1000 м без ограничения
Максимальное время полета	до 25 минут;
Максимальная дальность полёта	2 километра;
Камера CGO 3+	Объектив 14 мм / F2.8; разрешение фото – до 12.4 Мп; разрешение видео - 4K UHD 30 кадров/секунду, HD 1080p 120 кадров/секунду;

### 1.3.2 Спектральные камеры MAPIR Survey 2

Камеры MAPIR Survey2 (рис. 5) оснащены 16-мегапиксельным сенсором и объективом с различными фильтрами с заданными диапазонами пропускания спектра, в зависимости от модели камеры. Камера имеет режимы съемки по таймеру или через кабель управления. Так как камеры MAPIR физически не

могут быть подключены к БПЛА Yuneec Typhoon, съемка ОЭП «Погорельский бор» осуществлена камерами MAPIR в режиме таймера с интервалом времени 5 секунд с записью снимков в форматах JPG и RAW. Камеры крепятся к БПЛА на место его штатной камеры на специальной вибростабилизирующей платформе.



Рисунок 5 - Камера MAPIR Survey 2 NDVI [28]

Модель камеры MAPIR NDVI (Red+NIR) оснащена линзой с фильтром пропускания двух диапазонов спектра: ближнего инфракрасного (с центром в 850 нм) и красного (с центром в 660нм) свет. Изображения с данной камеры используются для расчета вегетационных индексов.

Камера Mapir Survey 2 создает изображения в двух форматах RAW и JPG и записывает их на карту памяти microSD. Форматы данных имеют большое значение для съемки - от них зависит качество ортофотомозаики. Формат JPEG является одним из наиболее популярных растровых форматов изображения. Снимки в формате JPEG нужны для быстрой визуализации данных и их предпросмотра.



Таблица 2 – Основные характеристика камеры MAPIR Survey 2

Разрешение изображения	16 мегапикселей (4608 x 3456 px), 12MP, 8MP, 5 МП, 3MP
Формат изображения	RAW + JPG, глубина цвета 24 бит
Оптика объектива	82 ° HFOV (Горизонтальное поле зрения) (23 мм)
GSD	4.05 cm/px (1.59in/px) at 120 m (~400 ft) AGL
Сенсор	Sony Exmor IMX206 16MP (Bayer RGB)
Чипсет	Novatek NTK96660
Скорость захвата	RAW+JPG: 3 Seconds / Photo. JPG: 2 Seconds / Photo
Батарея	Removable Li-ion 900mAh
Вес	47гр без батареи, 64гр с батареей
Размеры	59 x 41 x 30мм (длина x высота x глубина)
Память	Micro SD (Up To 128GB Card) (64GB Card ≈ 12,500 JPG, 1,750 RAW+JPG)
Светочувствительность (ISO)	50/100 */200/400, авто
Баланс белого	Авто /дневной свет/ Облачно/ Вольфрам/ Флуоресцентный/ синий/ светло-голубой/ красный/ светло-красный

Несжатые данные съемки со спектральных камер хранятся в RAW формате. RAW – формат цифровых файлов изображения, содержащий необработанные данные с фотоматрицы цифрового фотоаппарата. То есть в файлах в таких форматах содержится информация, полученная непосредственно с АЦП (аналого-цифровой преобразователь) об электрических сигналах матрицы, не имеющая какой-либо общепринятой спецификации (стандарта). Из-за технических особенностей матриц и АЦП разных производителей всеобщего стандарта RAW не существует, и файлы с разных устройств отличаются друг от друга, поэтому у производителя камер MAPIR, как и у других производителей устройств записи данных, свой специфичный алгоритм кодировки данных в формате RAW. Для обработки данных в формате RAW требуется его конвертация в другие общепринятые форматы, в нашем случае в формат данных TIFF.

### 1.3.3 Выполнение аэрофотосъемки

В техническом плане процесс аэрофотосъемки с использованием БПЛА состоит из двух этапов: подготовительного и собственно съемки.

На подготовительном этапе для планирования съемки производится следующие операции. Первая операция - изучение имеющихся материалов и местности; формирование или сбор требований к материалам, которые нужно получить по результатам съемки – тип и масштаб карты, границы объекта съемки; приведение их в технические требования к съемочным материалам: пространственное разрешение, координаты контура участка съемки, перекрытие снимков, точность определения координат центров фотографирования, требования к наземной опорной сети (при комбинированной съемке, например, когда привязка фотоплана производится по точкам наземной опорной сети, требования к точности определения КЦФ вообще не предъявляются) [5]. Вторая операция - формирование полетного задания для БПЛА. Выполняется программой-планировщиком полета, входящей в состав комплекса. Оператор должен выбрать используемый комплекс БПЛА (в случае, если программа позволяет работать с несколькими конфигурациями БПЛА и фотоаппаратуры), задать на карте контур участка съемки и примерное положение стартовой площадки, установить требуемое разрешение и перекрытие, после чего программа рассчитывает план полета и проверяет его выполнимость [5].

Для создания маршрута полета использовалась программа Flight Planner и стандартное ПО наземной станции управления гексакоптером. Flight Planner может использоваться в качестве утилиты конфигурации или в качестве дополнения динамического контроля для БПЛА. За один полет по стандартному маршруту над пробной площадью накапливается от 40 до 70 фотографий, что зависит от интервала таймера (3 – 5 секунд).



## 2 Обработка данных аэрофотосъемки

Для анализа данных, полученных с камер Mapir Survey2, необходима обработка данных. Последовательность этапов в процессе обработки растровых данных съемки пробной площади изображена на схеме ниже (рис. 6):

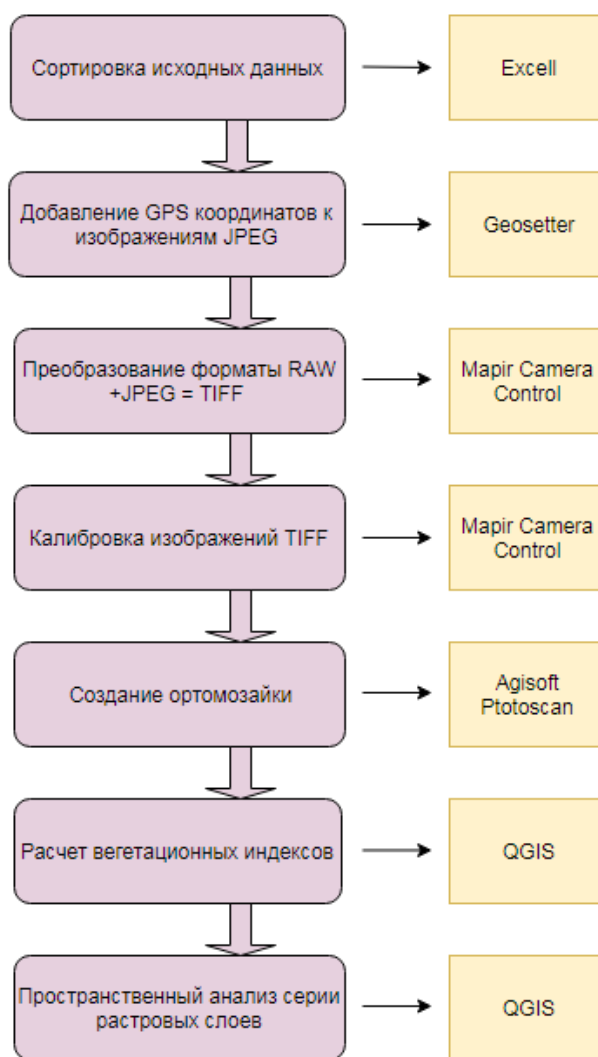


Рисунок 6 – Последовательность процессов обработки данных

Каждый из этих этапов имеет особенности. Первые три этапа в этой схеме относятся к процессу «предобработки данных». Сортировка исходных файлов приводит к созданию иерархии данных в каталоге с определённым размещением по дате съемки, типу камеры и формату файлов для систематизации дальнейшей обработки данных. Также проходит сортировка

данных по высоте съемки (200 м), удаляются ненужные фотографии. Под удалением ненужных фотографий, не относящихся к полету, подразумевается изображения, сделанные во время взлета и посадки БПЛА.

## 2.1 Геопривязка изображений

Исходные снимки, сделанные стандартной камерой DJI Phantom 3 Pro в 2016 году, сразу содержат данные об их местоположении и не требуют процедуры геопривязки. Однако, этот этап необходим для аэрофотоснимков, сделанных камерами MAPIR Survey 2 в 2017 году, так как камеры не имеют собственного встроенного GPS-приемника для автоматической локации снимков и не имеют возможности аппаратной синхронизации с данными GPS-приемника на борту БПЛА. С помощью геотегов на снимках впоследствии можно будет создавать ортомозаику изображений.

GPS-приемник есть на борту БПЛА. Во время полета гексакоптера создается файл маршрута (трек полета). В нем записывается местоположение гексакоптера относительно высоты, широты и долготы, также дата и время полета (рис. 7). Для дальнейшего использования данных о маршруте необходима конвертация трека из CSV в GPX формат.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	,fsk_rssi,voltage,current,altitude,latitude,longitude,tas,gps_used,fix_type,satellites_num,roll,yaw,pitch,									
2	20170519 16:33:59:165,-30,16.6,0.0,1.9522522E7,0.0,-150.99495,1.01,false,0,0,0.77,0.23000336,0.12,255,97,8									
3	20170519 16:33:59:314,-33,16.6,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,false,0,0,0.93,359.99,1.93,255,97,85,16,1,5,0,0.0									
4	20170519 16:33:59:345,-31,16.6,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,false,0,0,0.94,359.98,1.92,255,97,85,16,1,5,0,0.0									
5	20170519 16:33:59:406,-33,16.6,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,false,0,0,0.94,359.97,1.92,255,97,85,16,1,5,0,0.0									
6	20170519 16:33:59:446,-25,16.6,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,false,0,0,0.94,359.97,1.91,255,97,85,16,1,5,0,0.0									
7	20170519 16:33:59:484,-26,16.6,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,false,0,0,0.94,359.96,1.91,255,97,85,16,1,5,0,0.0									
8	20170519 16:33:59:525,-27,16.6,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,false,0,0,0.95,359.96,1.9,255,97,85,16,1,5,0,0.0									
9	20170519 16:33:59:643,-33,16.6,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,false,0,0,0.96,359.94,1.89,255,97,85,16,1,5,0,0.0									
10	20170519 16:33:59:685,-39,16.6,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,false,0,0,0.96,359.94,1.88,255,97,85,16,1,5,0,0.0									
11	20170519 16:33:59:725,-37,16.6,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,false,0,0,0.96,359.93,1.88,255,97,85,16,1,5,0,0.0									
12	20170519 16:33:59:766,-30,16.6,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,false,0,0,0.97,359.93,1.88,255,97,85,16,1,5,0,0.0									
13	20170519 16:33:59:806,-29,16.6,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,false,0,0,0.97,359.91998,1.87,255,97,85,16,1,5,0,0.0									
14	20170519 16:33:59:850,-27,16.6,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,false,0,0,0.97,359.91,1.87,255,97,85,16,1,5,0,0.0									
15	20170519 16:33:59:898,-25,16.6,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,false,0,0,0.98,359.91,1.86,255,97,85,16,1,5,0,0.0									

Рисунок 7 – Пример данных маршрута полета гексакоптера Yuneec Turphoon H в формате csv

Для создания геотегов нужна синхронизация времени полета гексакоптера и времени создания снимков. Важным для правильной синхронизации изображений с файлами данных GPS является правильное время камеры. Однако есть случаи, когда время записи изображения (настроек камеры) различаются фактическим временем полета БПЛА. Например, если часовые пояса различаются, то необходимо установить соответствующее смещение показателей времени. Так как данные GPS-треков полета БПЛА записываются в формате UTC с отставанием от наземного времени в 18 секунд, а настройка даты и времени камеры устанавливается вручную, соответственно есть временная разница.

Для задачи геопривязки снимков была использована программа GeoSetter – это бесплатный инструмент для геотеггинга с дополнительными функциями. Основная задача этой программы является добавление к изображениям GPS-координат, которые можно выгрузить с GPS треков фактического маршрута полета БПЛА, или задать координаты снимков вручную (рис. 8).

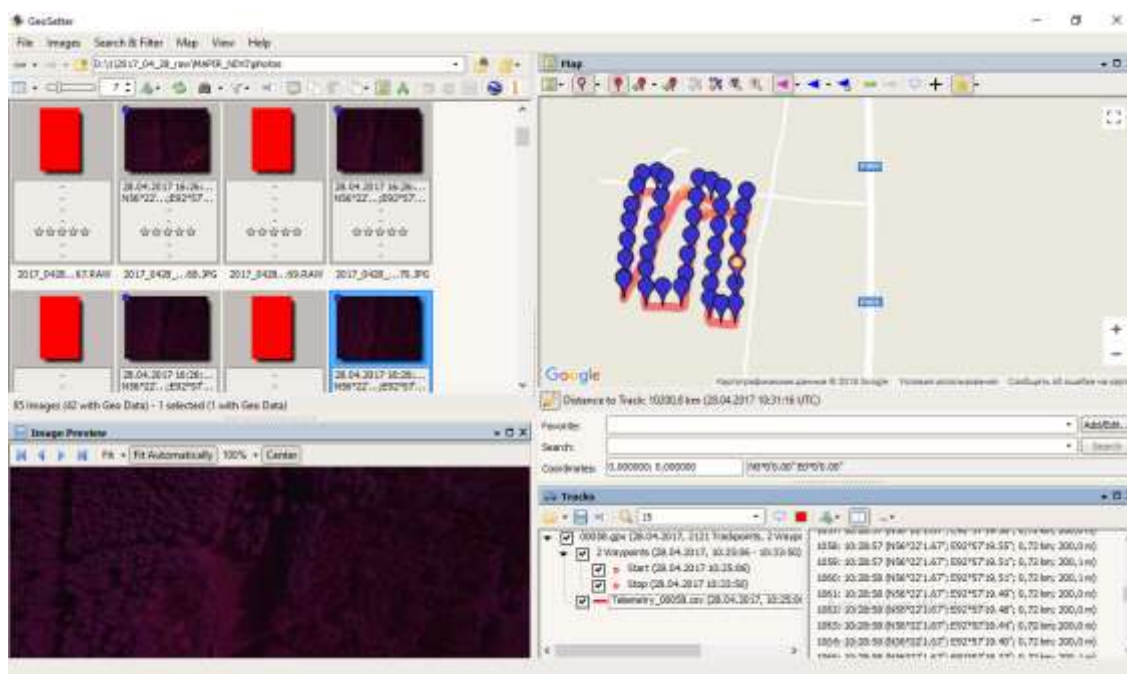


Рисунок 8 – Интерфейс программы GeoSetter. Карта маршрута полета БПЛА и положения снимков

Для синхронизации снимков и БПЛА-трека GeoSetter предлагает 4 решения.

1) Использовать локальные параметры Windows. Применяется, когда изображения были сделаны в том же часовом поясе, как указано в настройках ОС Windows. Если это не так, то геосеттер предлагает вам возможность сделать коррекцию времени.

2) Использовать заданный часовой пояс. Используется, когда изображения были сделаны в другом часовом поясе, отличающемся от системного времени ОС Windows. Существующий часовой пояс можно игнорировать, либо можно определить по Интернету.

Если при синхронизации изображений с файлами данных GPS существует временная разница, то геосеттер предложит сделать коррекцию времени. В настройке по содержимому изображения можно указать время отставания или опережения в этом диалоговом окне.

3) Использовать точку отслеживания на карте. Используется, если уже выбраны местоположение на карте с помощью красного маркера положения, который ссылается на точку видимой дорожки. Время смещения между значениями времени трека точки и все выбранные изображения будут затем вычислены по одному выбранному изображению.

4) Использовать путевую точку. Используется, если записана начальная путевая точка в треке, время которой можно синхронизировать с временем начала съемки изображений. Также есть возможность корректировки времени в диалоговом окне (рис. 9).

**Time Adjustment**

Since track files recorded by GPS receivers contain the date and time in UTC format (nearly Greenwich Mean Time, GMT), possibly the date time of your image be adjusted by adding or subtracting a time value depending for example on the time zone in which the images were taken. Furthermore the images maybe while daylight saving time which you have considered when adjusting the clock of your camera.

Please use 1 of the following 4 options below to adjust the date time of your images:

**Use Waypoint**

Use this option if you have recorded a waypoint together with taking an image.

(Result see below)

Days: 0    Hours: -1    Minutes: -59    Seconds: -46        Time will be adjusted by: -1:59:46 Hours

☒ Add Offset Values to Taken Date

Рисунок 9 – Настройки синхронизации с использованием путевой точки

## 2.2 Преобразование форматов и калибровка изображений

Преобразование исходных файловых форматов RAW и JPG камер MAPIR Survey 2 приводит к записи данных в общепринятые форматы (таких как TIFF), что необходимо для дальнейшей обработки данных в различных ПО, в частности в ГИС-программах. Для этого используется программа MAPIR Camera Control (далее MCC), в которой необходимо выбрать модель камеры и фильтр используемой камеры. После совмещения двух форматов на выходе получается изображение в формате tiff.

Следующий этап обработки данных – калибровка. Существует ряд факторов, которые приводят к помехам в данных съемки. В случае применения БПЛА это облака, которые создают тени на земле и уменьшают уровень освещенности. Решением этой проблема является съемка мишени, содержащей калибровочную поверхность (рис. 11), для калибровки каждого последующего снимка пробной площади и нормализации пикселей изображений, используя известное значение отражательной способности.

Мишень содержит 4 объекта, которые были измерены на инкрементальных длинах волн спектрометром (калиброванным лабораторным инструментом). Алгоритм программы МСС распознает границы калибровочной поверхности и трех отражающих элементов на ней по изображению QR кода. Он также может быть распознан с любого угла с камерой благодаря таким же общим и диффузным свойствам отражения.



Рисунок 11 – Калибровочная поверхность для камер MAPIR Survey 2

Затем значения пикселей исходного изображения пробной площади сравниваются с известными значениями отражения мишеней, используя эту информацию в программе калибровки изображений MAPIR Camera Control, преобразуются значения пикселей и, таким образом, исходные изображения корректируются.



## 2.3 Компоновка ортофотомозаики

Следующий этап обработки данных БПЛА – создание ортофотомозаики.

Ортофотомозаика – это процесс яркостного выравнивания и объединения («сшивки») нескольких ортотрансформированных изображений (снимков) в одно непрерывное изображение с заранее заданным качеством. Ортомозаика в отличие от ортофотоплана не имеет ортогональную проекцию. При выполнении картирования с применением БПЛА для дальнейшего составления ортофотомозаики местности необходимо планировать параметры полета (высоту, скорость, форму маршрута) и осуществлять съемку с наложением кадров (снимков), перекрытие которых должно составлять от 60% до 80% по горизонтали и вертикали. При этой методике одинаковые участки поверхности присутствуют одновременно на нескольких кадрах и при дальнейшей обработке в фотограмметрической программе изображения «соединяются» на основании совпадения характерных признаков, становясь единым ортофотомозаикой (рис. 13). При этом программа выбирает из исходных снимков преимущественно центральную часть кадра, наименее подверженную перспективным искажениям по причине широкого угла объектива камеры, т.к. в итоговой карте нам требуется вид древостоя (и отдельных деревьев) сверху.

В настоящее время существует множество программ для компоновки ортофотомозаики в виде облачных сервисов, приложений или интегрируемых ГИС-модулей (библиотек), которые обладают различным набором функций. Ниже приведен их краткий обзор.

К платным сервисам относятся следующие сервисы:

- облачный сервис MAPIR Cloud (90\$/мес.) от компании Agribotix FarmLens;
- многофункциональный облачный сервис Drone Deploy (99\$/мес.) сшивает изображения в ортомозаику высокого разрешения, экспорт в формат PDF, создает трехмерную модель и карту высот и пр.;

– облачный сервис Airinov (19€/month) на веб-платформе AIRINOV FARMING преимущественно для мониторинга сельхозугодий; он позволяет следить за обработкой данных каждого участка съемки, получать качественные результаты калибровки снимков. Airinov поддерживает наборы данных мультиспектральных камер SEQUOIA или multiSPEC;

– программа UASMaster для полной обработки данных, полученных с помощью БПЛА. UASMaster сочетает в себе простоту использования с полной мощностью фотограмметрической рабочей станции, имеет концепцию открытого рынка и может обрабатывать данные многих производителей камер для БПЛА.

– автономное ПО Agisoft PhotoScan которое выполняет фотограмметрическую обработку цифровых изображений, направленный на создание трехмерных изображений профессионального качества. Основываясь на новейших технологиях 3D реконструкции Multi-View, она работает с произвольными изображениями и эффективна как в контролируемых, так и в неконтролируемых условиях. Фотографии могут быть взяты из любой позиции, при условии, что объект, который будет реконструирован, виден по крайней мере на двух фотографиях. Как выравнивание изображения, так и реконструкция трехмерной модели полностью автоматизированы.

– пакет ПО Pix4Dmapper Pro от компании Pix4D, способный обрабатывать аэро- и наземные изображения и создавать композиты в 2D и 3D;

– автономные программы Drone Mapper REMOTE и EXPERT;

– мощная и полностью автоматизированная платформа 3DR Site Scan создана для комплексного решения сбора и анализа данных реальности с использованием популярных облачных систем;

– приложение Reality Capture (от 99€ за 3 мес.) может обрабатывать данные гораздо быстрее своих конкурентов, и управляться с огромным количеством изображений на обычном настольном ПК с графическим процессором NVidia. Reality Capture превосходит другое ПО благодаря функции быстрого выстраивания, позволяющей пространственно упорядочить



изображения за несколько секунд. Это отличный инструмент для проверки данных прямо на месте съёмки, чтобы убедиться, что изображений достаточно.

К бесплатным сервисам относятся следующие сервисы:

- инструментарий Open Drone Map с открытым исходным кодом для обработки аэрофотоснимков. OpenDroneMap превращает простые изображения в трехмерные географические данные, которые можно использовать в сочетании с другими географическими наборами данных. Родной ОС для данной программы является Ubuntu, то также работает в ОС Windows с использованием Docker («контейнер»), чтобы избежать необходимости в точной конфигурации, для которой был создан проект. Продукт является бесплатным;

- локальное приложение ESRI Drone2Map (for ArcGIS), которое превращает необработанные неподвижные изображения от беспилотных летательных аппаратов и создает цифровые модели поверхности, ортофотопланы, облака 3D-точек и 3D-PDF-файлы, которые могут использоваться совместно. Данные, обработанные Drone2Map, также могут быть представлены в онлайн сервисе ArcGIS компании Esri и интегрированы в ArcGIS для дальнейшей обработки.

Ортофотомозаики снимков пробной площади были скомпонованы с помощью фотограмметрической обработки исходных мозаик (наборов) снимков в программе **Agisoft Photoscan**. Примеры ортофотомозаик пробной площади изображены на рисунках 2 и 12.



Рисунок 12 – Контуры крон деревьев и границы секторов географических культур лиственницы ОЭП «Погорельский бор»

Далее, по составленным RGB ортофотомозаикам пробной площади на разные даты съемки контуры крон деревьев были оцифрованы в ГИС-программе QGIS 2.8 методом ручного добавления полигонов в новый векторный слой, из которого были рассчитаны площади крон деревьев ( $S_{\text{crown}}$ ,  $\text{м}^2$ ) и добавлены в базу данных инвентаризации климатипов лиственницы.

### **3 Применение вегетационных индексов в анализе фенофаз**

#### **3.1 Фенологические фазы лиственницы**

Фенологическое развитие древесных растений является важнейшим интегральным показателем их биологических особенностей, закрепленных в генотипе, и отражает экологическую реакцию растений на сезонные и суточные изменения тех факторов внешней среды, которые прямо или косвенно воздействуют на ритм жизни вида [8].

Фенофаза – регулярно и закономерно повторяющиеся явления роста и развития растения и его отдельных органов [8]. Цикл смены фенофаз у растений составляет 1 год, который делится на 2 основных периода: вегетация и покой. У листопадных растений эти периоды выражены достаточно четко. Относительный покой наблюдается с момента наступления устойчивых холодов и до начала весны. Период вегетации у листопадных растений начинается с набухания почек, завершается листопадом.

Степень детализации фенологического цикла лиственницы, т.е. дифференциация отдельных процессов в периоде её вегетации, различна у многих исследователей, которые, например, выделяют несколько фенофаз в развитии почек, как набухание и распускание мужских и женских генеративных почек отдельно [9]. Однако, с учетом поставленных задач работы и методов получения данных, условно и однозначно можно выделить следующие фенологические фазы в хронологическом порядке их смены [1]:

- 1) набухание и распускание почек;
- 2) цветение (пыльца);
- 3) рост побегов и распускание хвои;
- 4) рост фитомассы кроны (и стволовых тканей);
- 5) пожелтение хвои;
- 6) листопад (опадение хвои);
- 7) зимний покой.

Первые фенологические фазы лиственницы, в частности набухание и распускание почек, цветение (пыление) и рост побегов, возможно определить только наземными методами в непосредственной близости к исследуемым деревьям (находясь в лесу). Дистанционными методами зондирования эти фенофазы малоразличимы от состояния зимнего покоя, т.к. они не сопровождаются увеличением «зеленой фитомассы» деревьев. То есть на изображениях аэрофотосъемки с высоты около 200 м визуально можно различить фенофазы от распускания хвои до листопада (рис. 13).

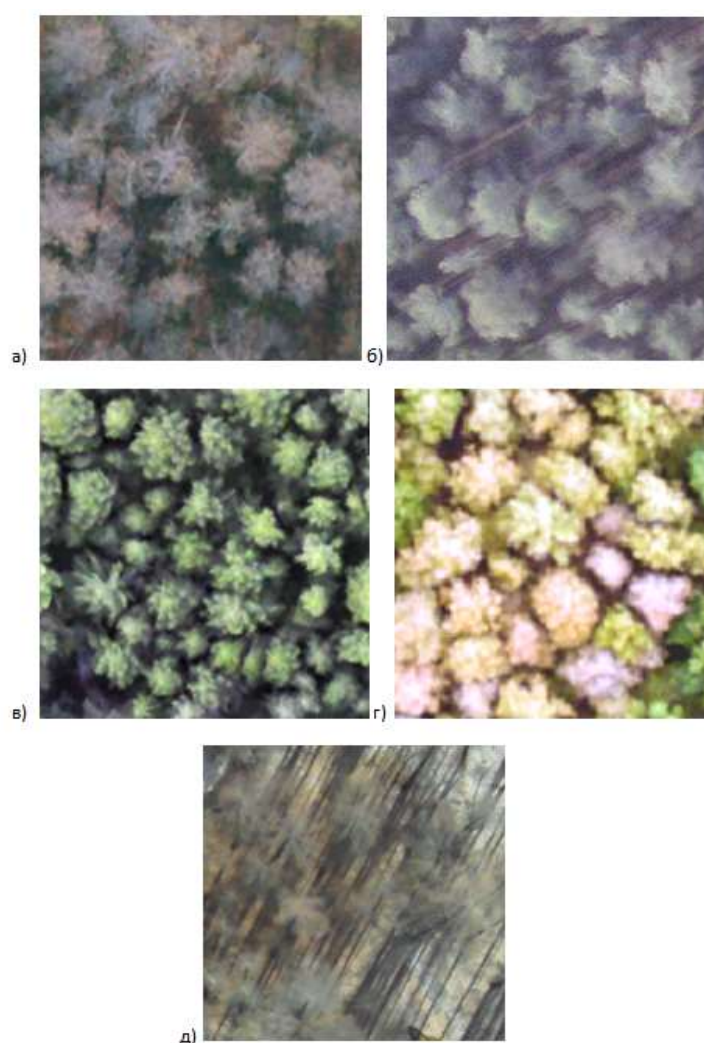


Рисунок 13 – Примеры различных фенофаз лиственницы по данным аэрофотосъемки в видимом диапазоне спектра (RGB): а) набухание и распускание почек, б) распускание хвои, в) рост фитомассы кроны, г) пожелтение хвои, д) опадение хвои -> зимний покой.



Вегетационный индекс – это результат математических вычислений из различных комбинаций (соотношений) значений яркости в нескольких спектральных каналах съемочной аппаратуры (камеры). В настоящее время существует несколько десятков индексов, характеризующих состояние растительности по какому-либо показателю, обзор которых был сделан в этой работе. Применительно к задаче исследования можно рассмотреть выбор из основных вегетационных индексов, перечень которых с формулами расчета и их назначением (областью применения) указан в приложении В.

Для анализа фенологического развития лиственных выбраны четыре индекса растительности: классический нормализованный разностный вегетационный индекс (Normalized Difference Vegetation Index, далее NDVI), разностный вегетационный индекс (Difference Vegetation Index, далее DVI), модифицированное простое отношение (Modified Simple Ratio, далее MSR) и вегетационный индекс с коррекцией на почву (Soil-adjusted vegetation index, далее SAVI). Этот набор индексов выбран по причине того, что исходные данные образованы съемкой в спектральных каналах NIR и Red.

Индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – нормализованный относительный индекс растительности является простым показателем количества фотосинтетически активной биомассы. Это один из самых распространенных и давно используемых индексов для решения задач, использующих количественные оценки в оценке жизненного состояния растительного покрова [6].

Индекс DVI – это индекс, с помощью которого измеряют перпендикулярное расстояние от почвенной линии до точки RED-NIR в пикселе. Изовегетационная линия может иметь произвольный наклон и проходит через начало координат.

Индекс MSR – вегетационный индекс, который активно реагируют на изменение биомассы растений. Значение этого индекса находится в диапазоне от 0 до 30. Спектр применения данного вегетационного индекса: точное

земледелие, мониторинг лесов, мониторинг естественной растительности, распознавание стресса растений.

Индекс SAVI – почвенный вегетационный индекс, представляет из себя нечто среднее между относительными и перпендикулярными индексами. Изовегетационные линии не являются параллельными и не сходятся в одной точке. Почвенная линия имеет наклон 1 и проходит через точку «0».

Расчет вегетационных индексов выполнен поканально в программе QGIS, используя инструмент «калькулятор растра», при этом данные ортофотомозаик с камеры MAPIR Survey 2 NDVI содержат два слоя (растра) - каналы NIR и Red, композит RGB содержит три слоя (каналы Red, Green, Blue). В результате расчета создавался новый растр, содержащий один канал с значениями рассчитываемого индекса.

### **3.2 Анализ вегетационных индексов**

В начале вегетационного сезона значения индекса NDVI и других индексов возрастают, в момент цветения значения рост останавливаются, затем по мере развития вегетации в сезоне, NDVI снижаются.

По данным съемки на 20 апреля 2017 года деревья на пробной площади еще находились в фазе зимнего покоя. Через 8 дней (28.04.17) процесс вегетации уже начался. Поэтому вегетационные индексы были рассчитаны для 4 дат съемки: 28 апреля, 13 июля, 29 июля и 29 августа (рис. 13, рис. 14, рис. 15, рис. 16).

На рисунке 13 в начале сезона вегетации (28 апреля) индекс NDVI показал разницу между фенофазами разных видов деревьев из разных мест происхождения. Максимальные значения данного индекса за весь вегетационный период колеблются от 0,17 до 0,24. Также карта индексов SAVI визуально имеет сходство с картой NDVI, но индекс SAVI имеет больший диапазон значений (от –0,01 до 0,37). Однако некоторые секторы, относящиеся к видам лиственницы Гмелина, выделяются на фоне остальных, имеют более

высокие значения индекса, из этого следует, что фенофазы данных культур лиственницы начинаются раньше.

В начале июля, значения всех индексов приобрело относительно равномерное распределение, кроме значений индекса DVI (рис. 14). На всех картах индексов видны контуры крон деревьев, однако на карте индекса DVI (рис. 14 б) этот эффект проявлен более отчетливо. Причиной является то, что индекс DVI не нормирован, теневые области снимков контрастируют с областями крон деревьев.

В конце июля, когда объем фитомассы (хвои) исследуемых деревьев значительно увеличивается, пространственный контраст значений вег. индексов нивелируется, распределение индексов равномерно по всем секторам. Однако величины всех индексов понизились по сравнению с началом июля, кроме значений индекса DVI (рис. 15). Это может быть связано с ошибками калибровки снимков.

Стоит также заметить, что в конце августа значения вег. индексов (рис. 16) многих деревьев в секторах понизился, из этого следует, что деревья переходят к фенофазе пожелтения листвы. На карте индекса DVI также хорошо различимы кроны деревьев. На снимках за конец августа также ясно видны некоторые секторы с деревьями, относящиеся к видам лиственницы, фаза вегетации которых началась раньше остальных, и которые выделяются из общей массы высоким значением индекса. Из чего можно заключить, что данные виды лиственницы имеют большую длину вегетационного сезона, в отличие от других видов.

Из анализа данных, следует, что индекс SAVI имеет похожую пространственную динамику с NDVI, однако диапазон его значений больше. Наилучшим образом показал себя индекс MSR, с помощью него можно четко проследить динамику изменения в фенофазах. В результате сравнения индексов, были сделаны выводы, что самые лучшие индексы – MSR и SAVI.

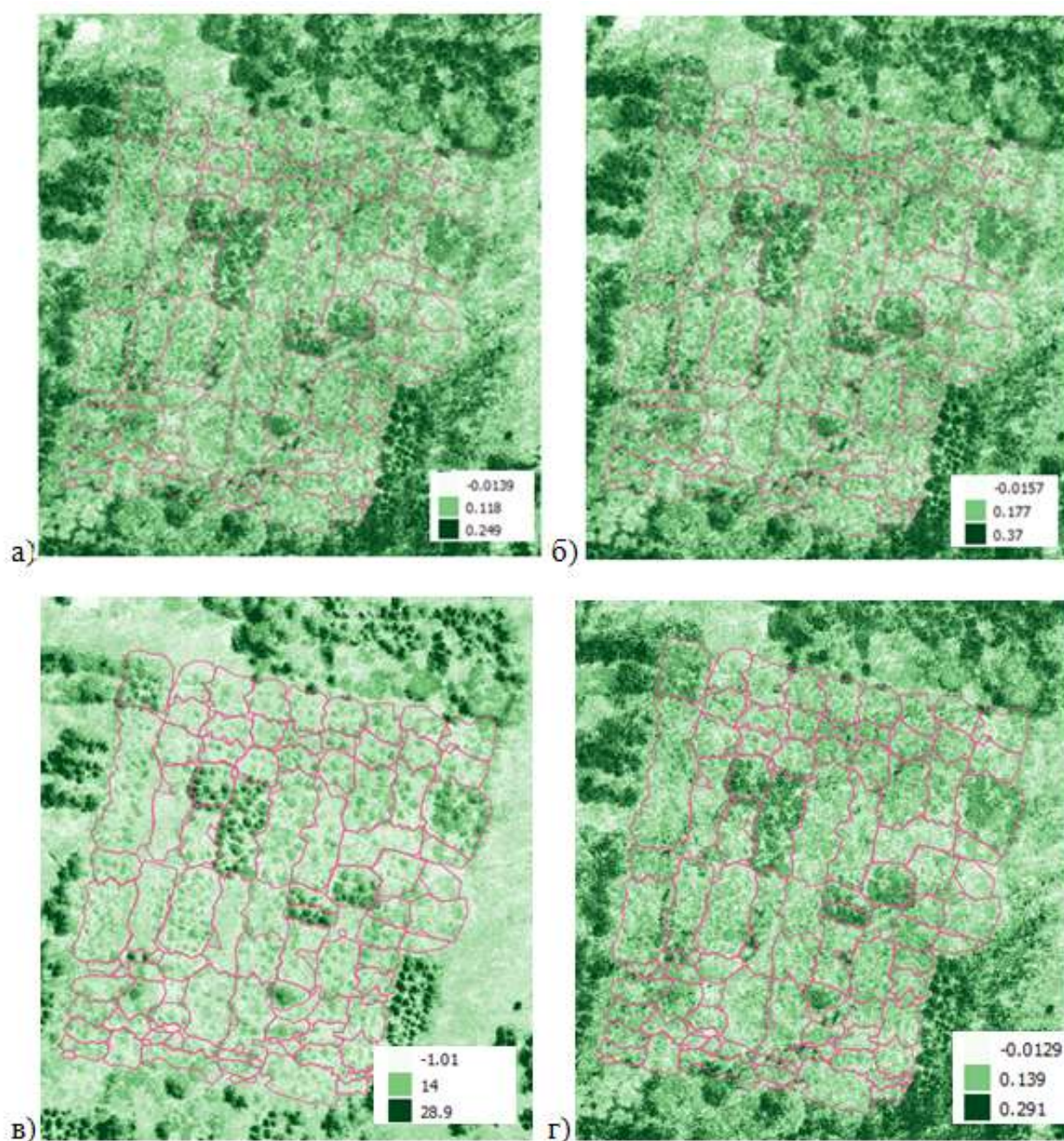


Рисунок 13 - Карты вегетационных индексов за 28 апреля 2017 г.:

а) NDVI, б) SAVI, в) DVI, г) MSR



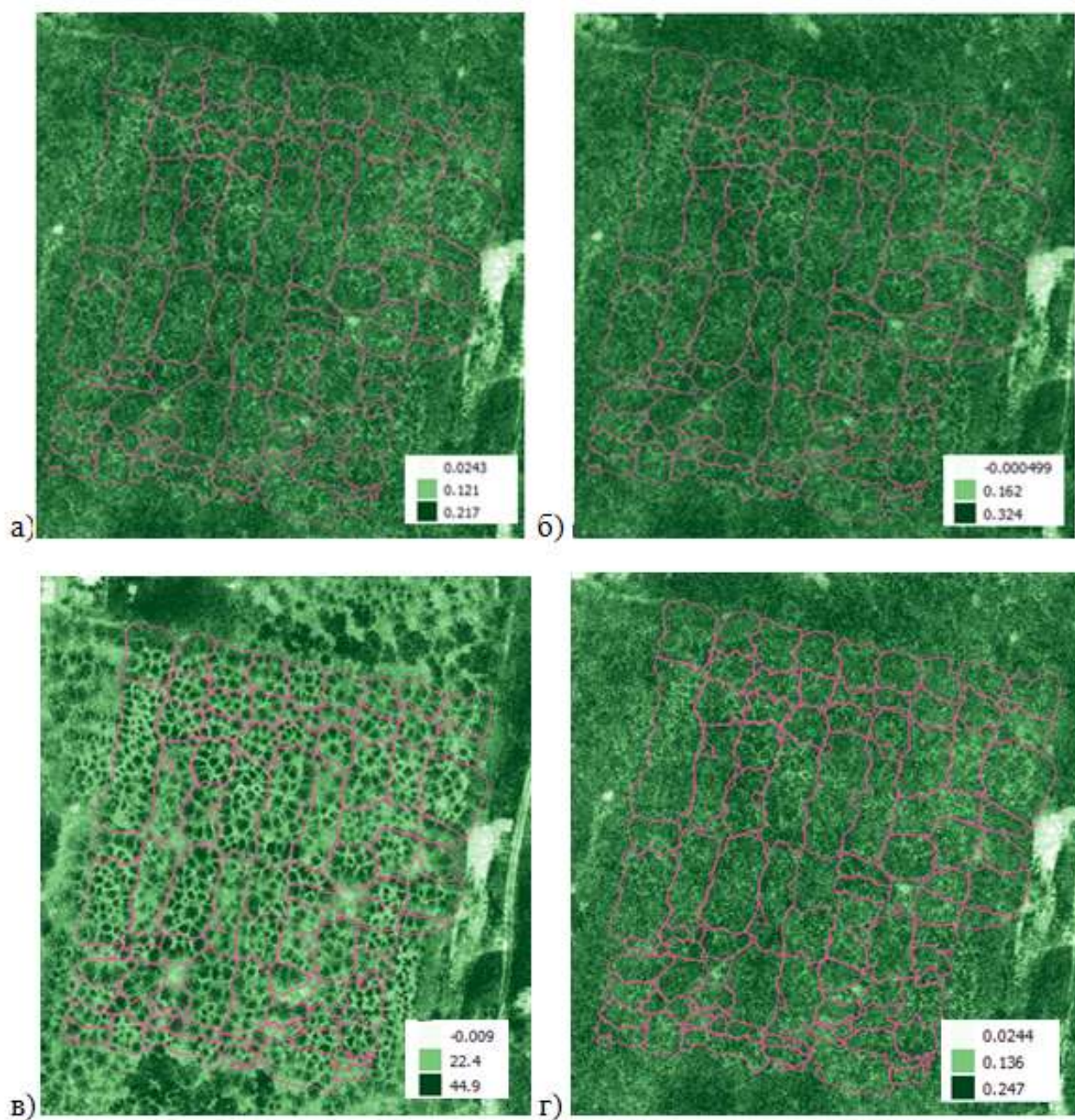


Рисунок 14 - Карты вегетационных индексов за 13 июля 2017 г.:

а) NDVI, б) SAVI, в) DVI , г) MSR



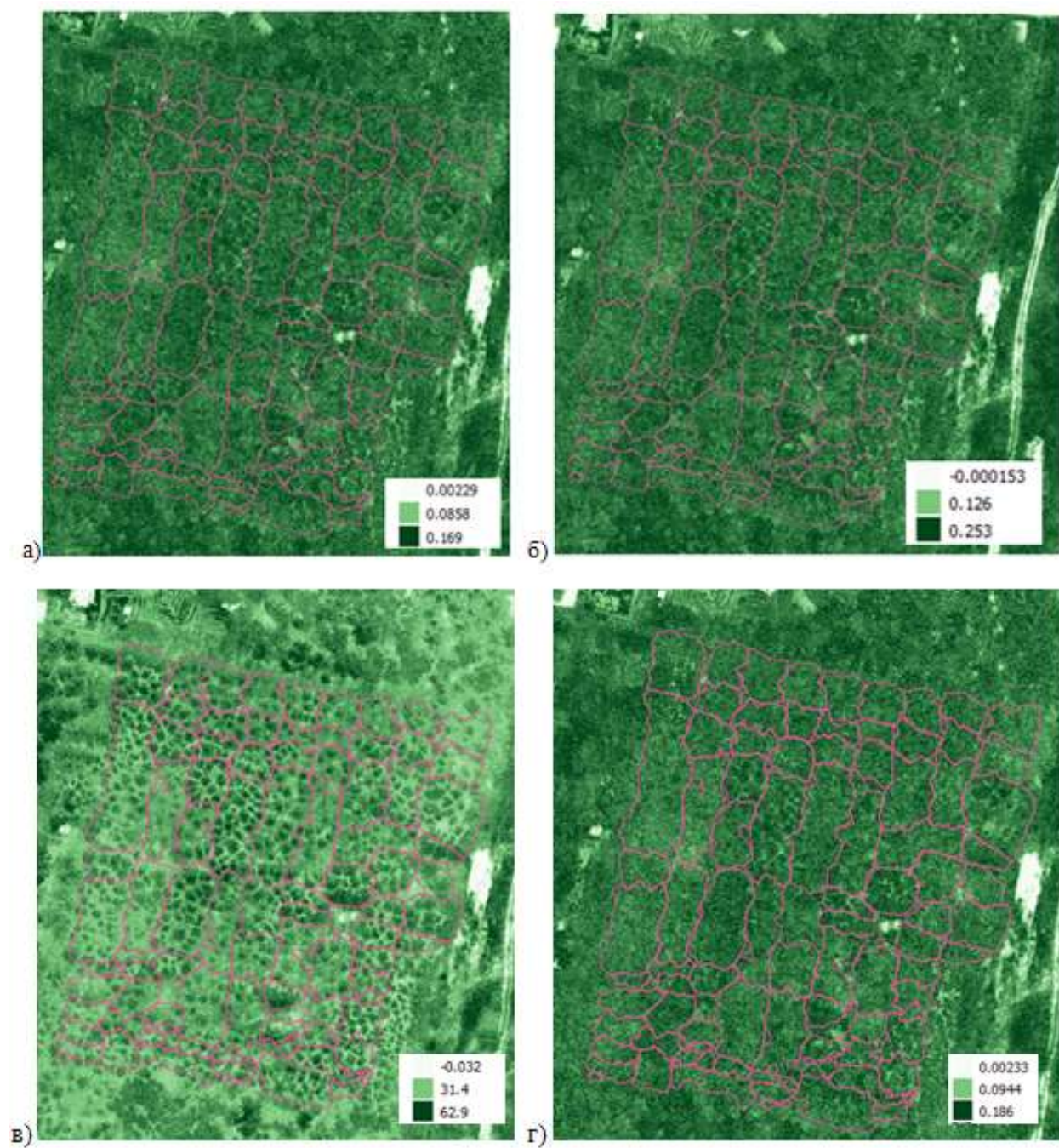


Рисунок 15 - Карты вегетационных индексов за 25 июля 2017 г.:

а) NDVI, б) SAVI, в) DVI, г) MSR



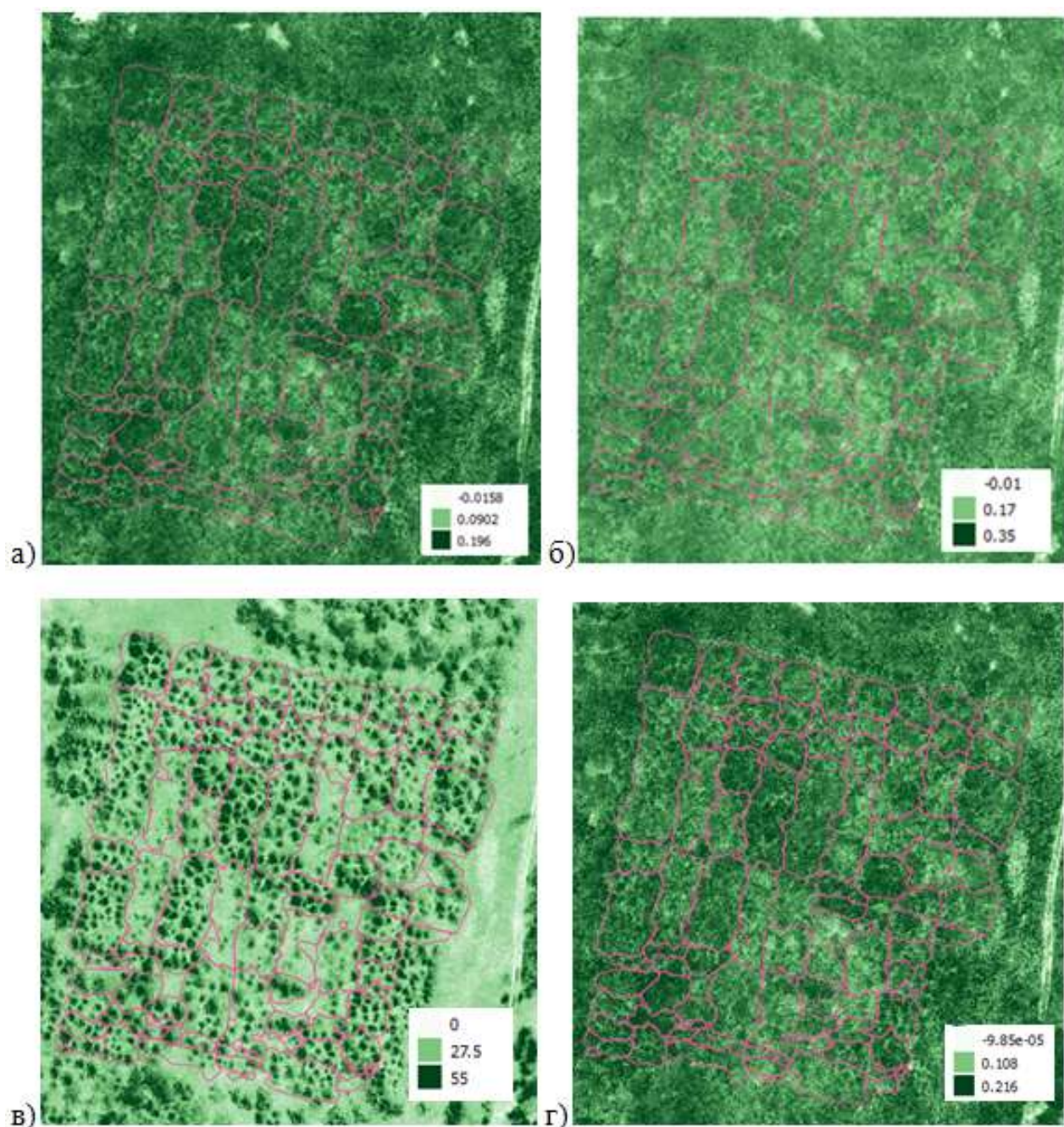


Рисунок 16 - Карты вегетационных индексов за 29 августа 2017 г.:

а) NDVI, б) SAVI, в) DVI, г) MSR

На этом этапе работы вег. индексы были рассчитаны для всей области ортофотомозаики, куда попадают деревья других пород, не относящихся к пробной площади, следовательно, дальнейшим этапом является составления подробной зональной статистики по индивидуальным секторам. Ортофотомозаики были обрезаны по секторам для всех дат съемки в вегетационном сезоне 2017 г. (рис. 17, рис. 18).



### 3.3 Зональная статистика индексов по группам деревьев

Для определения групп видов лиственницы, в вегетаций которых имеются временные сдвиги относительно других видов, применена зональная статистика расчета средних значений вегетационного индекса MSR и SAVI для каждого сектора. Оба индекса имеют схожую сезонную и пространственную динамику, как на уровне зональных средних значений, так попиксельно, немного отличающуюся диапазоном колебаний значений от минимальных до максимальных величин.

В анализе зональной статистики индексов SAVI и MSR использовались биржевые графики (в рис. 20, 21, 22, 23 приведен пример индекса SAVI), из которых определено, что 23 апреля 2017 г. вегетационный сезон еще не начался (рис. 20, SAVI на уровне 0, аналогично для MSR), и только единичные виды лиственницы показывают положительные значения этих индексов – к ним относятся лиственница Гмелина, а также лиственница сибирская из Республики Хакасии.

По данным на 28 апреля 2017 года (рис. 21) можно отметить разницу между отдельными геогр. культурами. Некоторые из них достигли среднего значения в секторах до 0,25, тогда как другие сектора имеют среднее значения SAVI от 0,1 до 0,2. Это подтверждает факт временного сдвига фенофаз некоторых культур, т.е. дата начала вегетационного сезона наступает раньше других.

В июле также особой разницы между средними значениями культур лиственницы в секторах, все культуры имеют схожее значение индекса (рис. 22). Проанализировав рис. 23 заметно понижение значений индекса SAVI, что свидетельствует о наступлении фенофазы пожелтения (частичного) хвои деревьев. Однако деревья вида *Larix gmelinii* показывают все также высокие значения SAVI. Это подтверждает факт, что данный вид лиственницы имеют большую длину вегетационного сезона.



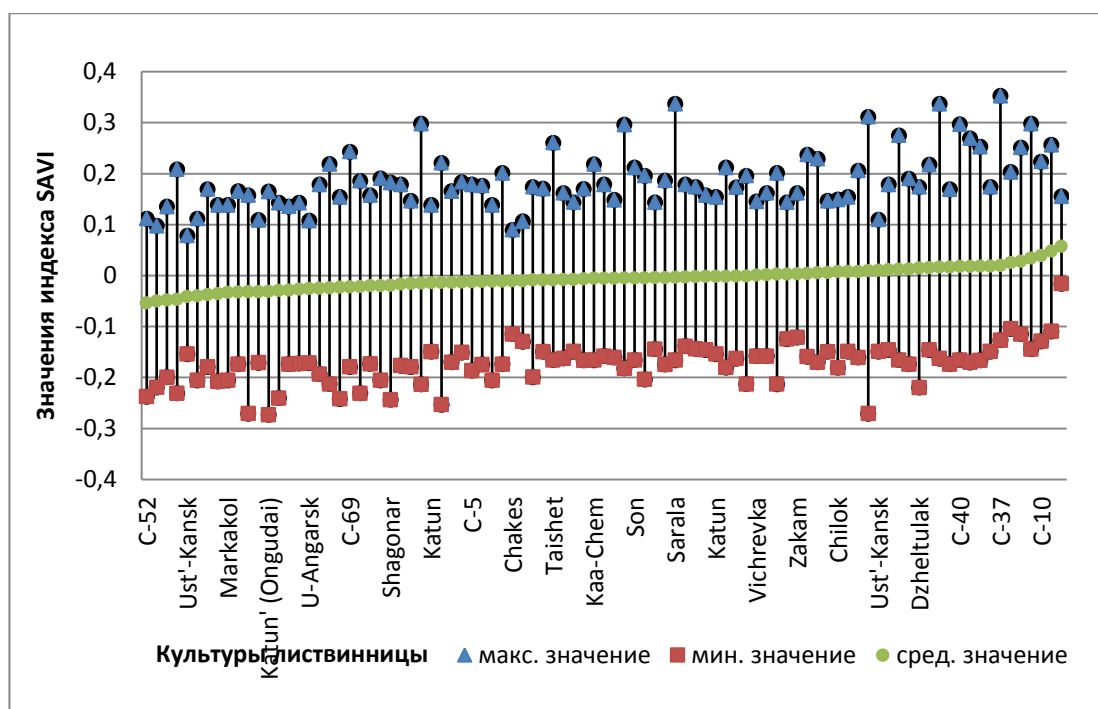


Рисунок 20 – Распределение вегетационного индекса групп лиственницы, ранжированного по возрастанию за 23 апреля 2017 года

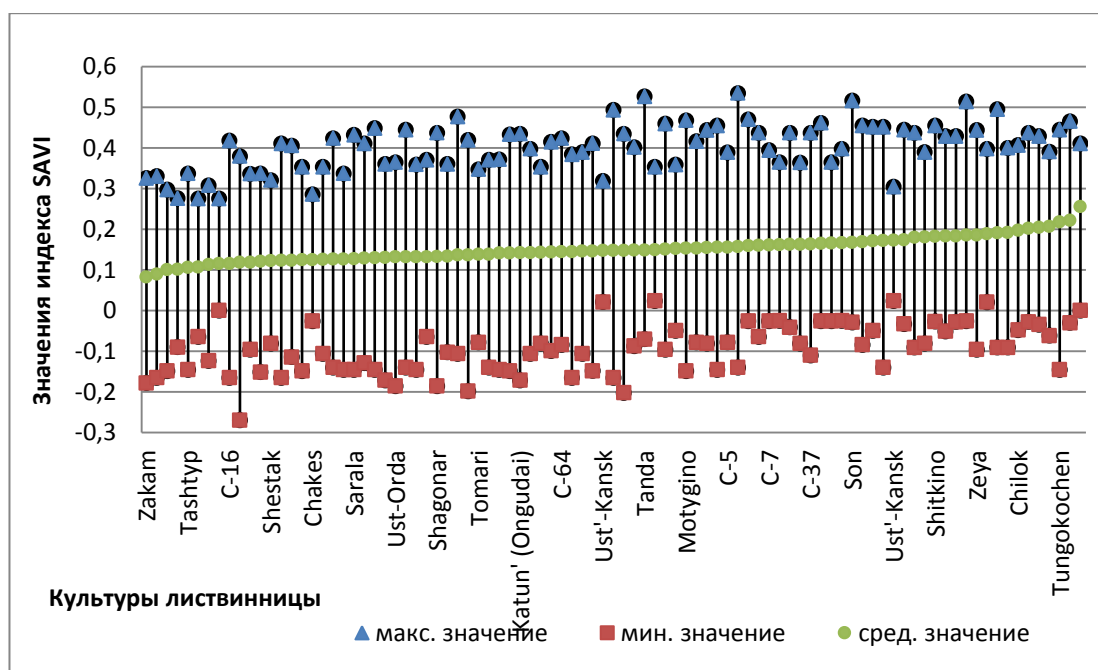


Рисунок 21 – Распределение вегетационного индекса SAVI групп лиственницы, ранжированного по возрастанию за 28 апреля 2017 года

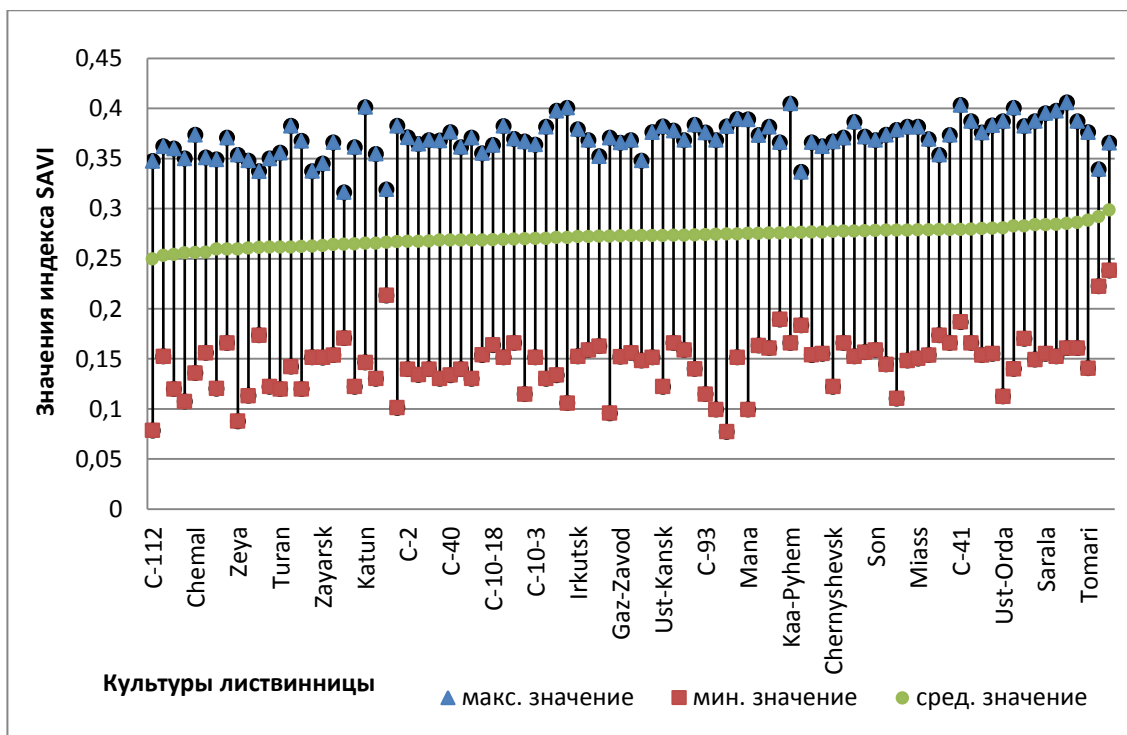


Рисунок 22 – Распределение вегетационного индекса SAVI групп лиственницы, ранжированного по возрастанию за 13 июля 2017 года

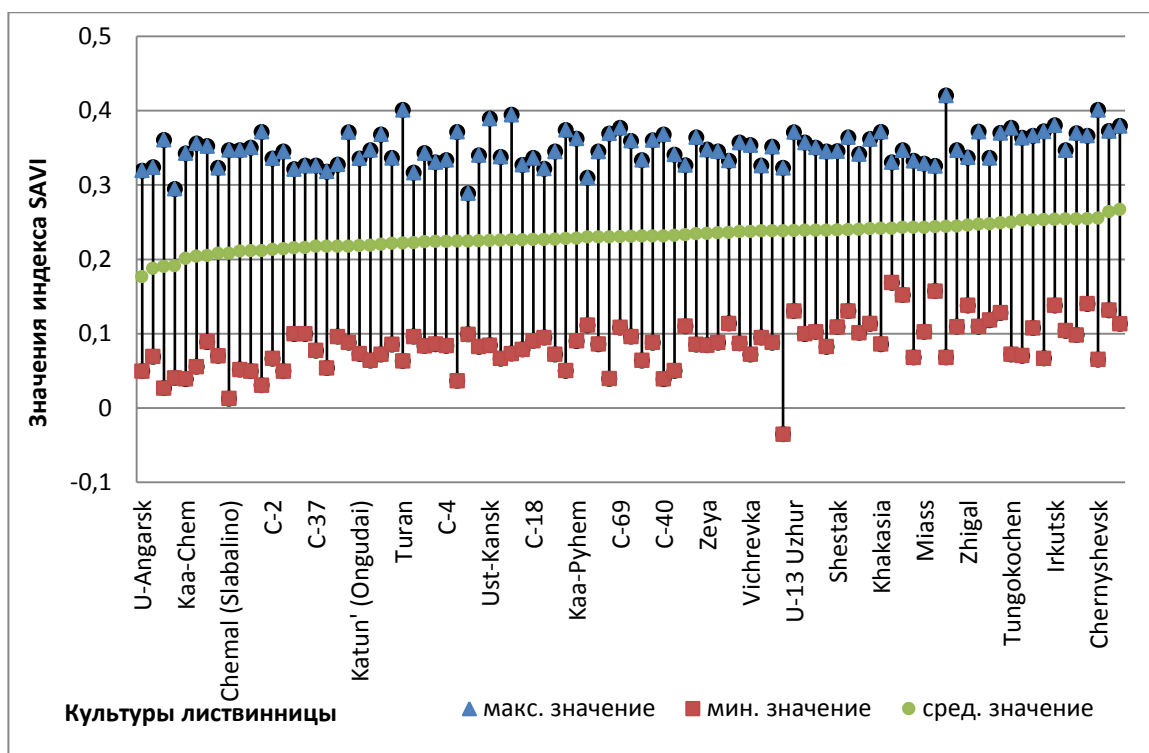


Рисунок 23 – Распределение вегетационного индекса SAVI групп лиственницы, ранжированного по возрастанию за 29 августа 2017 года

Далее для выделения различий в средних значениях MSR была применена визуализация растрового слоя MSR с пороговой классификацией диапазона значений этого вегетационного индекса (рис. 19). Опытным путем было установлено, что оптимальным является выделение трех классов.



Рисунок 19 – Классы средних секторальных значений вегетационных индексов MSR за 28 апреля 2017 г.

Выявлено, что деревья, относящиеся к секторам, которые имеют самое высокое среднее значение индекса MSR в начале вегетационного периода (28 апреля 2017 г.), относятся к виду лиственницы *L. gmelinii* Rupr., а именно мест происхождения из Чернышевска, Зеи, Тунгокочена, Газимурского Завода и Желтулака. Виды лиственницы *L. leptolepis* Gord и *L. sukaczewii* Dylis имеют самые низкие средние значения индекса MSR по секторам. Остальные виды имеют низкое и среднее значения индекса MSR (рис. 19).



## **4 Анализ морфометрических показателей**

### **4.1 Построение аллометрических уравнений**

Используя морфометрические показатели лиственницы, которые были измерены во время инвентаризации, были построены основные аллометрические уравнения для отдельных групп геогр. культур лиственницы.

В лесоведении и экологии растений общепринятым является аллометрический метод оценки фитомассы лесных насаждений по результатам обмеров модельных деревьев, представленных во всем диапазоне распределения стволов по диаметру. Для решения различных исследовательских задач представляют интерес фактические данные оценки лесных насаждений с характеристикой морфометрических параметров деревьев, предназначенные для многоцелевого применения – экологического моделирования, проведения лесоинвентаризационных работ и лесотаксационного дешифрирования аэрокосмических снимков [9].

В данной работе проанализированы основные характеристики лиственницы по ростовым показателям на основании гистограмм распределения значений диаметров стволов (DBH) (рис. 24), площадей крон ( $s_{\text{crown}}$ , м<sup>2</sup>) (рис. 25), высот деревьев ( $H_{\text{tree}}$ , м) (рис. 26), протяженности живой части кроны ( $L_{\text{crown}}$ ) (рис. 27), а также регрессионных уравнений их соотношений.

Величины диаметров стволов деревьев в основном лежат в пределах 110–230 мм (рис. 24) со средним значением 177 мм, показатели площади кроны деревьев варьируют от 2 до 8 м<sup>2</sup> (рис. 25) со средним 5,9 м<sup>2</sup>, высота деревьев от 7 до 23 метров (рис. 26) со средним 20,3 м.

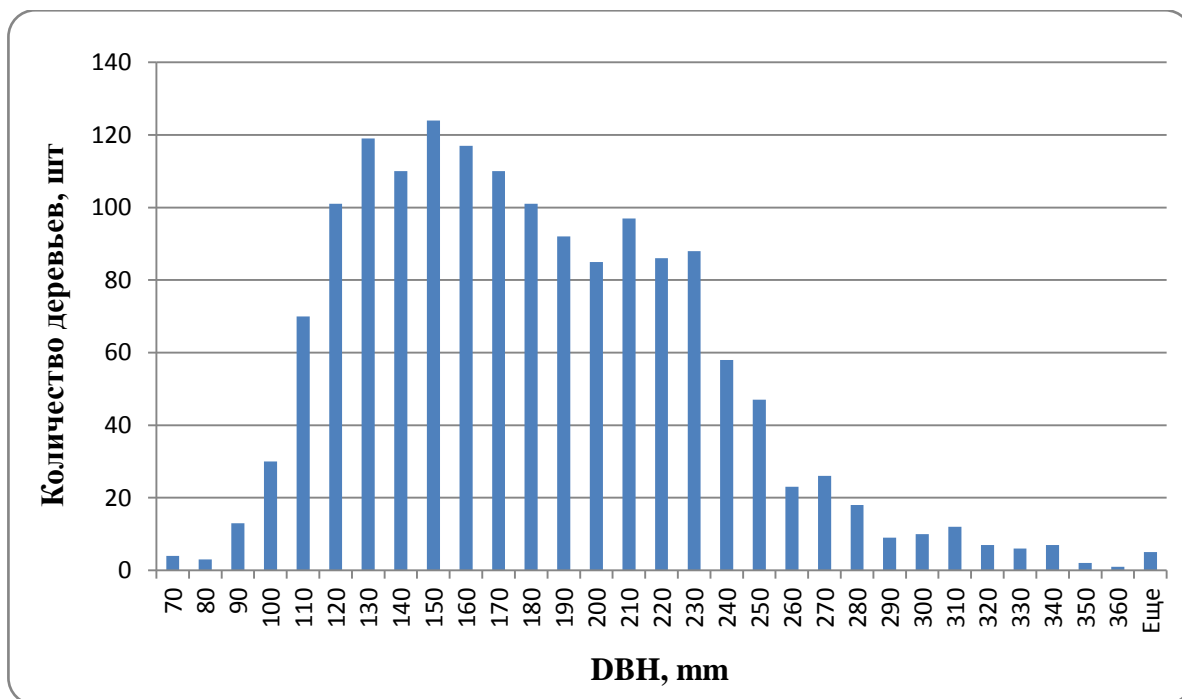


Рисунок 24 – Гистограмма распределения значений диаметра ствола (DBH)  
(все географические культуры)

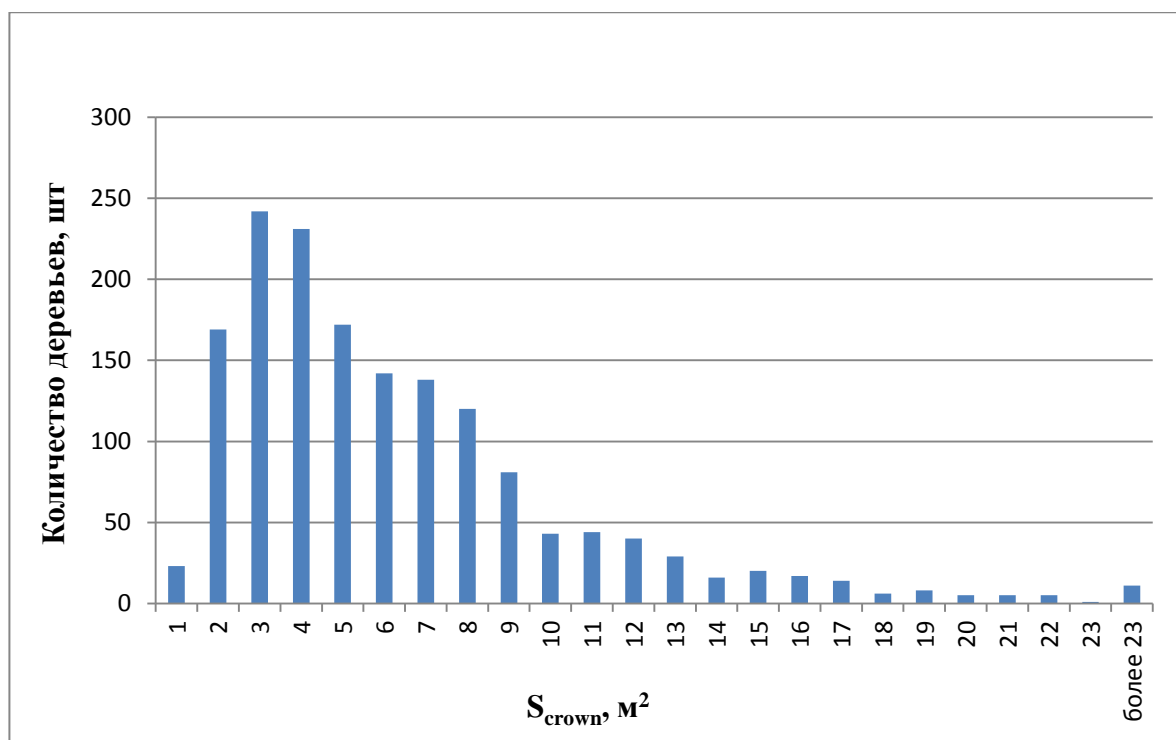


Рисунок 25 – Гистограмма распределения значений площадей крон  
деревьев  $S_{crown}$  (все географические культуры)

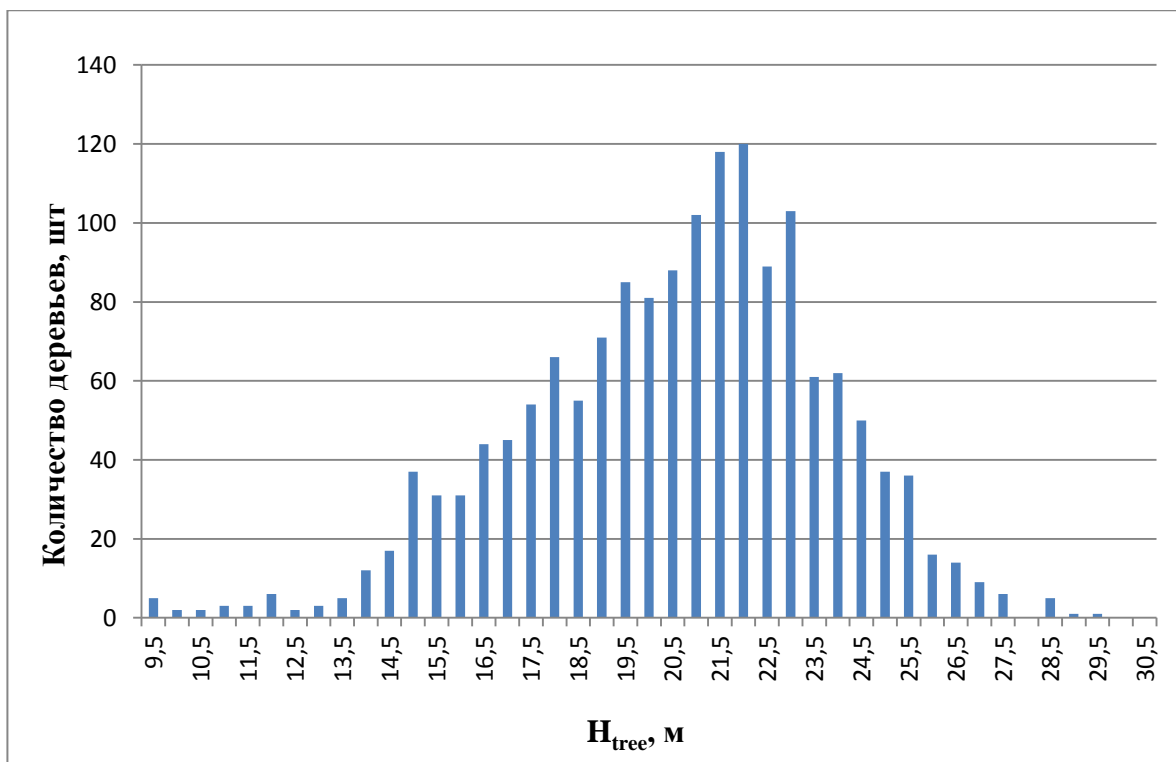


Рисунок 26 – Гистограмма распределения значений высоты деревьев  $H_{tree}$  (все географические культуры)

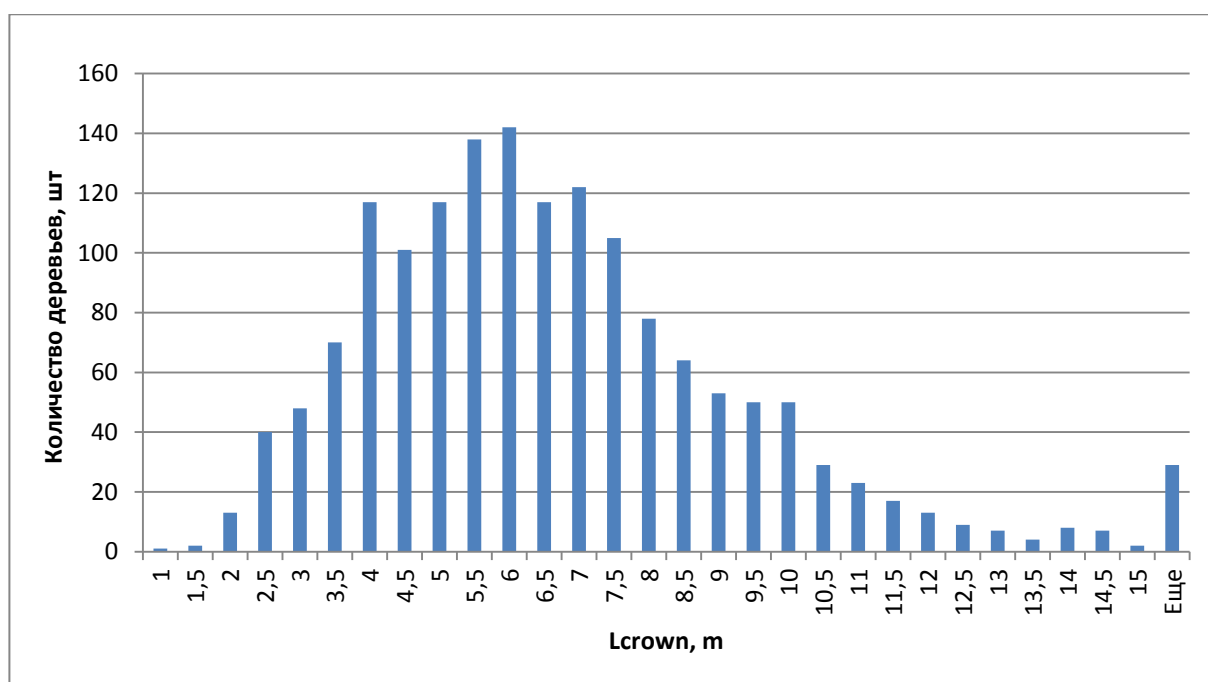


Рисунок 27 – Гистограмма распределения значений протяженности живой кроны деревьев  $L_{crown}$  (все географические культуры)

В анализе данных выявлена зависимость диаметра ствола (рис. 28) от площади кроны деревьев, которая имеет логарифмический вид. Это важно для решения задач инвентаризации древостоев методами дистанционного мониторинга. Диаметр ствола в свою очередь зависит от высоты дерева (рис. 29), протяженности живой части кроны ( $L_{\text{crown}}$ ) зависит от высоты деревьев.

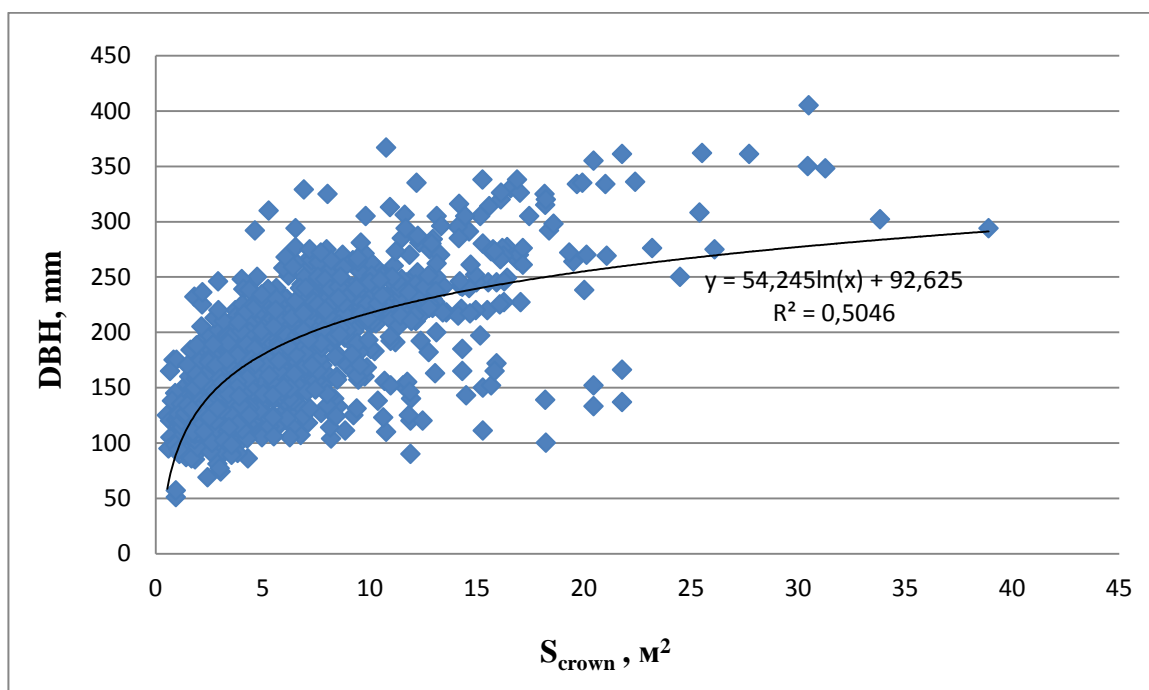


Рисунок 28 – Соотношение значений диаметра ствола (DBH) к площади кроны ( $S_{\text{crown}}$ ) всех исследуемых деревьев

Показатель высоты дерева тесно коррелирует с диаметром ствола дерева, что наглядно показано на рисунке 29. Учитывается также зависимость диаметра ствола от площади кроны ( $S_{\text{crown}}$ ,  $\text{m}^2$ ) от протяженности живой части кроны ( $L_{\text{crown}}$ ) и от высоты дерева ( $H_{\text{tree}}$ , м) (рис. 30).

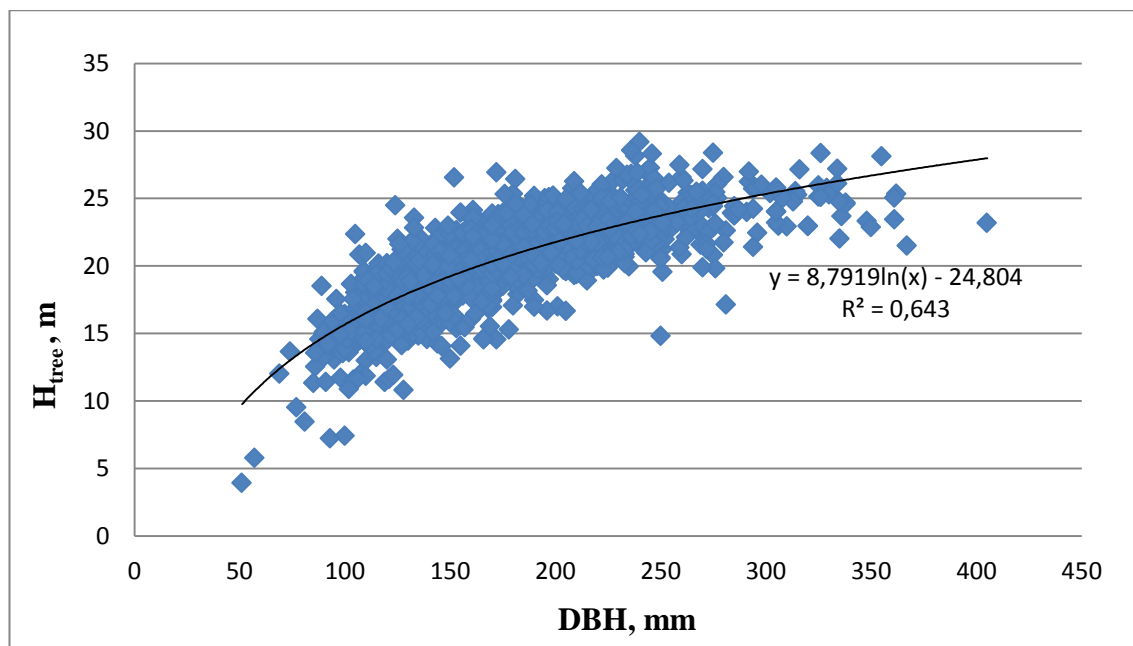


Рисунок 29 – Соотношение значений диаметра ствола (DBH) к высоте деревьев ( $H_{\text{tree}}$ ) всех исследуемых деревьев

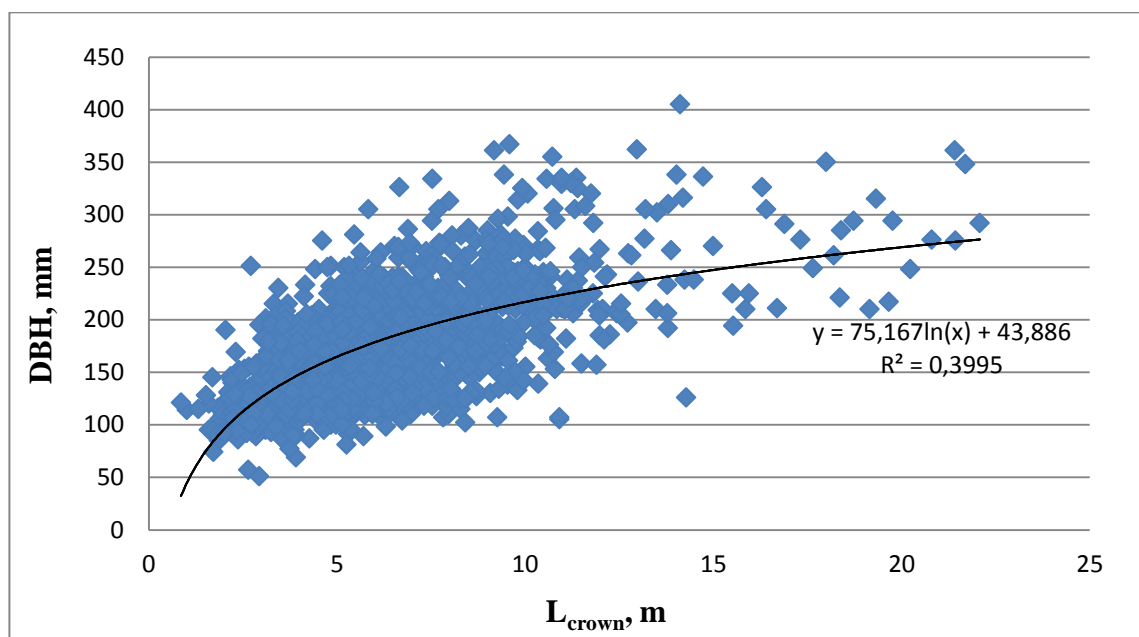


Рисунок 30 – Отношение диаметра ствола (DBH) к длине протяженности живой части крон деревьев ( $L_{\text{crown}}$ ) всех исследуемых деревьев

И итоге пространственного анализа установлены аллометрические уравнения зависимости морфометрических показателей лиственницы.

## 4.2 Пространственный анализ по видам

Был произведен пространственный анализ лиственниц разных видов, то есть мест происхождения. Всего видов пять: японской (*L. leptolepis* Gord), Чекановского (*L. x czekanowskii* Szaf.), сибирской (*Larix sibirica* Ledeb), Гмелина (*L. gmelinii* Rupr.), Сукачева (*L. sukaczewii* Dylis). В анализ не входил виды лиственницы Сукачева и Чекановского, так как количество деревьев, относящихся к данным видам менее 45.

Остальные культуры разделены по видам и по ним также были построены уравнения морфометрических показателей климатипов лиственницы (рис. 28, 29, 30).



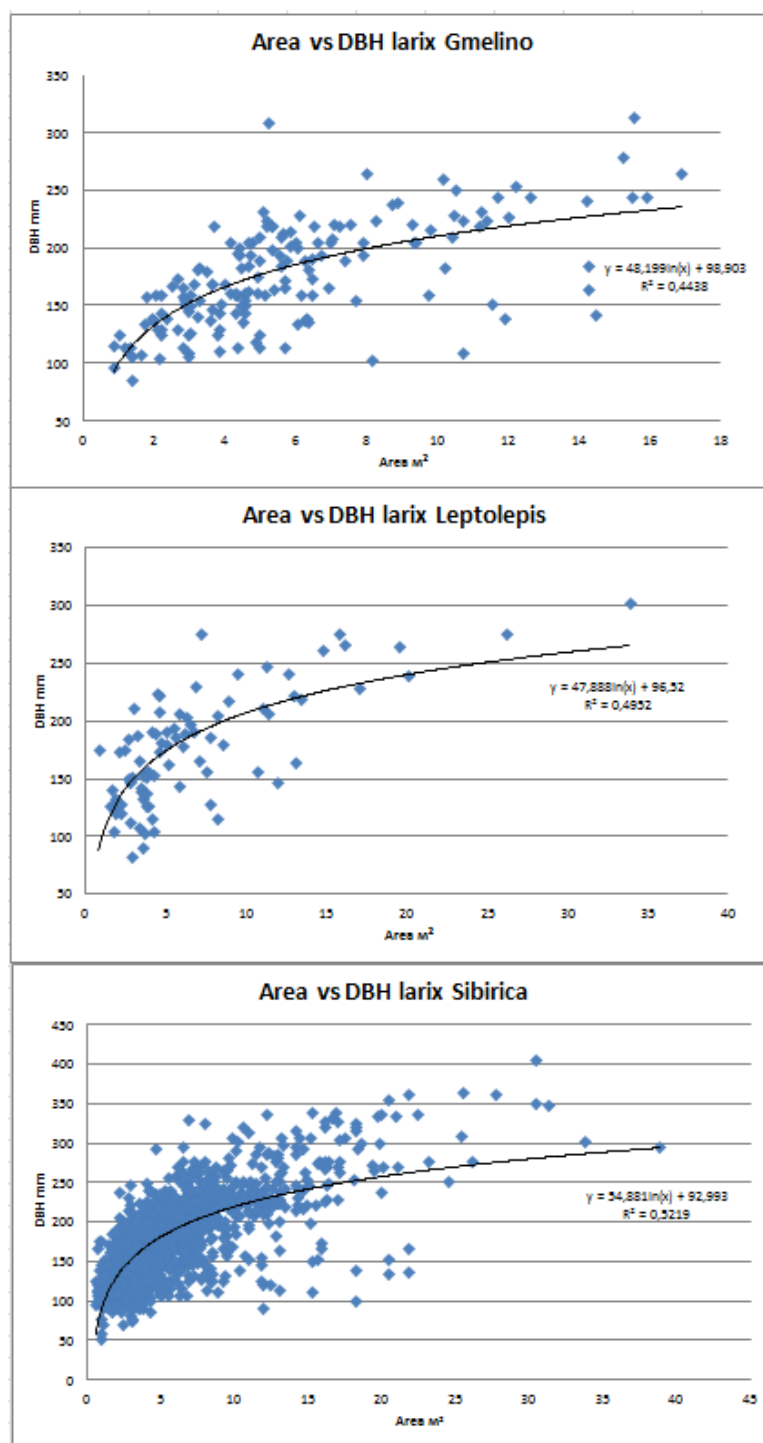


Рисунок 28 – Соотношения площади кроны ( $S_{\text{crown}}$ ) к диаметру ствола деревьев (DBH) для разных видов лиственницы.

Из анализа сделан вывод, что виды лиственницы Гмелина и японская имеют при том же диаметре ствола, большую площадь кроны, чем другие виды лиственницы (рис. 28). Тогда как деревья лиственницы сибирской имеют большие диаметры ствол, но кроны этого вида имеют небольшую площадь.

Существует прямая зависимость высоты деревьев от диаметра ствола дерева, соотношения этих двух параметров имеет линейную зависимость (рис. 29).

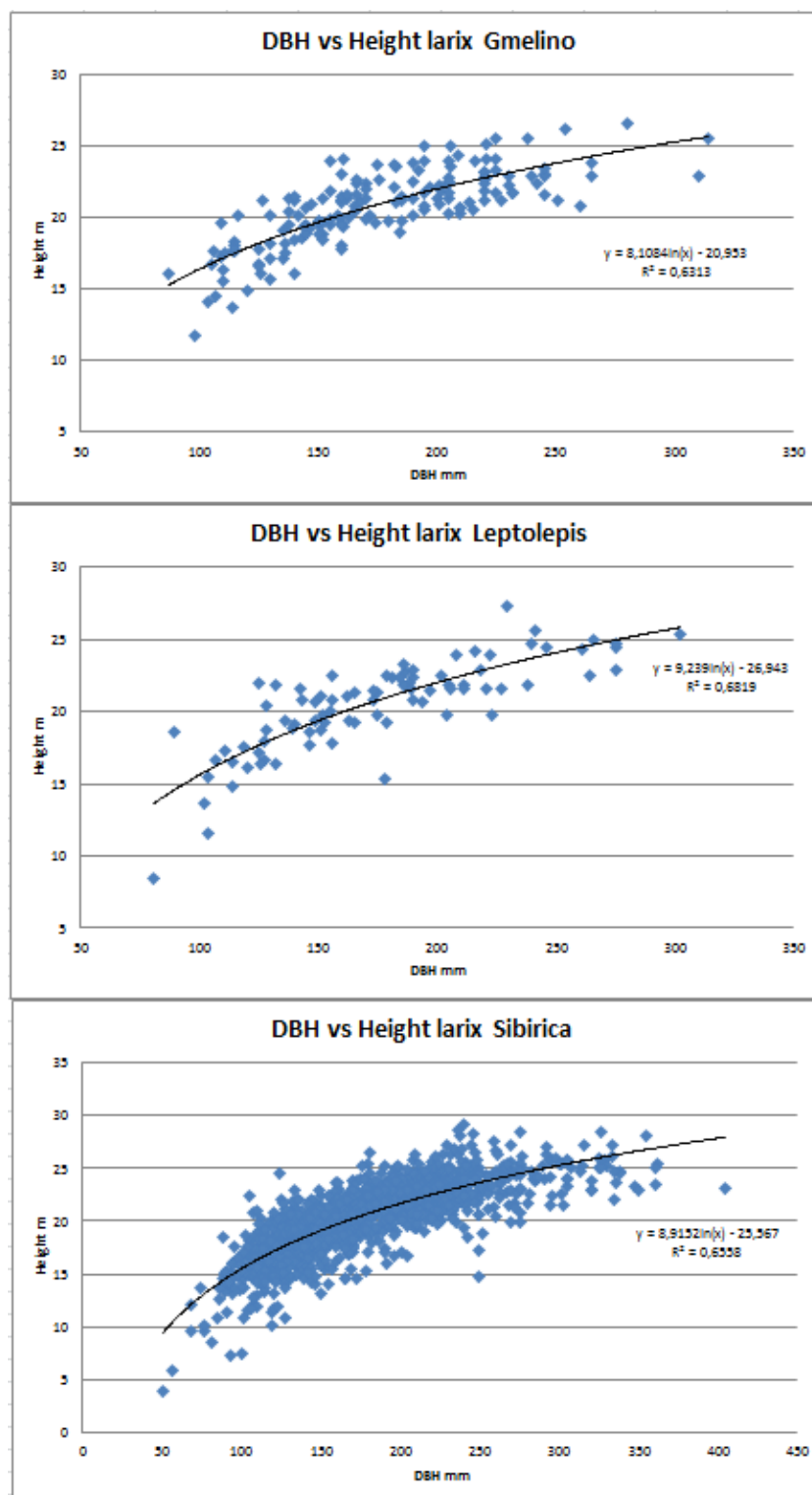


Рисунок 29 – Соотношения площади кроны диаметра ствола (DBH) к высоте ( $H_{tree}$ ) деревьев для разных видов лиственницы.

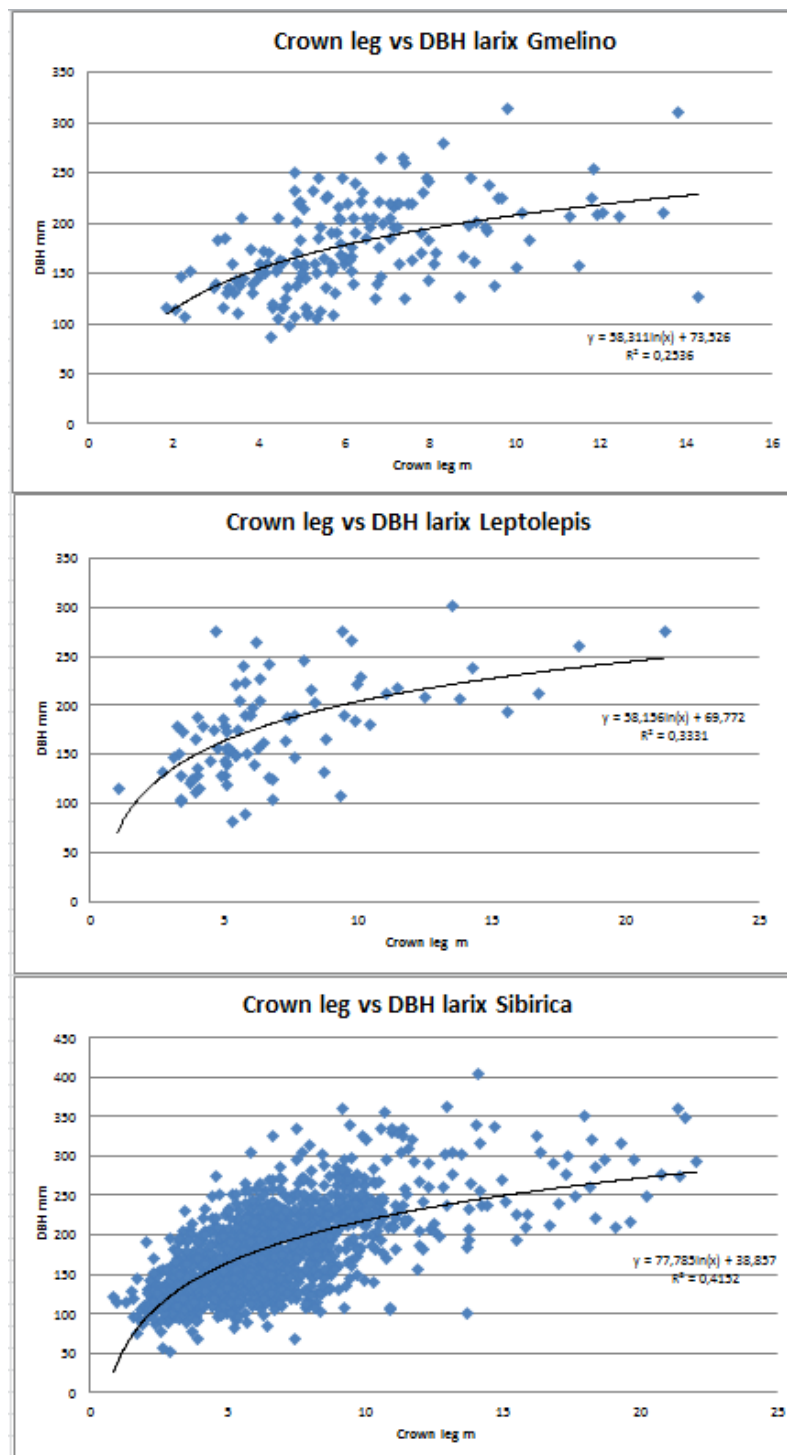


Рисунок 30 – Соотношения длины протяженности живой кроны ( $L_{\text{crown}}$ ) к диаметру ствола деревьев (DBH) для разных видов лиственницы

Таким образом были построены основные аллометрические зависимости климатипов лиственницы, по которым можно сделать вывод, что некоторые виды лиственницы имеют характерные аллометрические отличия.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполненной работы был проведен анализ морфометрических показателей, их взаимосвязей и различий фенологических циклов географических культур (климатипов) лиственницы на пробной площади в ОЭП «Погорельский бор» Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН. Для решения поставленных задач применялись ГИС-данные наземной инвентаризации за 2016 год, а также снимки высокого разрешения, сделанные с помощью аэрофотосъемки с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в периоды вегетационных сезонов 2016 и 2017 годов. Контуры крон деревьев климатипов лиственницы оцифрованы и рассчитаны значения их площади, которые занесены в базу данных инвентаризации пробной площади.

Из набора снимков с БПЛА была создана серия ортофотомозаик, а также произведена их калибровка, что позволило произвести расчет и анализ вегетационных индексов NDVI, SAVI, MSR и DVI за 2017 год. В ходе анализа выявлено, что применение некоторых индексов наилучшим образом подходит для изучения динамики фенофаз деревьев. Для дифференциации объектов (климатипов лиственницы) отлично подходит индекс DVI. Наиболее близкий к NDVI – индекс SAVI, однако он показывает более высокие значения. Наилучшим образом показал себя индекс MSR, с его помощью можно четко проследить динамику изменения в фенофазах. В результате сравнения индексов, были сделаны выводы, что лучшие индексы в решении поставленных задач – MSR и SAVI.

На основе анализа серии карт пространственно-временной динамики вегетационного индекса SAVI выявлены группы климатипов лиственницы на исследуемой пробной площади, имеющие существенные различия дат начала вегетационного сезона (фенофаз) в 2017 году, к которым относятся вид лиственницы Гмелина.

В работе были представлены основные аллометрические зависимости морфометрических показателей климатипов лиственницы через регрессионные

уравнения, по которым можно сделать вывод, что некоторые виды лиственницы имеют характерные морфометрические отличия.

Таким образом, поставленные задачи решены в полном объеме, цель работы достигнута.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Барченков, А.П. Изменчивость лиственницы в географических культурах в Красноярской лесостепи / А. П. Барченков // Лесное хозяйство. - 2011. –№1. –С. 25-27.
2. Ирошников, А.И. Географические культуры хвойных в Южной Сибири / А.И. Ирошников // Географические культуры и плантации хвойных в Сибири / – Новосибирск, 1977. – С. 64-110.
3. Букша, И.Ф. Современные технологии инвентаризации и мониторинга лесов / И.Ф. Букша // Оборудование и инструмент для профессионалов. –2004. – №3(50). – С.8-9.
4. Лабутина, И.А. Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга экосистем ООПТ: Методическое пособие / Лабутина И.А., Балдина Е.А. – Москва: WWF, - 2011. – 90 с.
5. Иноземцев, Д.П. Автоматизированная аэрофотосъёмка с помощью программно-аппаратного комплекса GeoScan-PhotoScan / Д. П. Иноземцев // САПР и ГИС автомобильных дорог. –2014. –№ 1(2). –С.46-51
6. Жирин, В.М. Многолетняя динамика вегетационных индексов темнохвойных лесов после повреждения сибирским шелкопрядом / В.М. Жирин, С.В. Князева, С.П. Эйдлина // Лесоведение, –2016, –№ 1. –С. 3-14.
7. Романовский, М.Г. Листовой индекс в исследованиях продукционного процесса / М. Г. Романовский // Продукционный процесс и структура лесных биогеоценозов: теория и эксперимент. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2009. – С. 129-160.
8. Антонова, Г.Ф. Сезонное развитие флоэмы в стволах лиственницы сибирской / Г.Ф. Антонова В. В. Стасова // Онтогенез. – 2008. – Т. 39, № 4. – С. 259-272.



9. Данилин, И.М. Морфометрические параметры и фитомасса деревьев лиственницы сибирской в Восточном Хэнтэе (Северная Монголия) / И.М. Данилин, З. Цогт // Сибирский лесной журнал. –2015. – №5. – С.96-104
10. Паутова, Н.В. Особенности фенологического развития и адаптации лиственницы сибирской в условиях европейского Северо-Востока / Паутова Н.В. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. –2011. – №1(4). –С
11. Авдеева, Е.В. Рост и индикаторная роль древесных растений в урбанизированной среде: монография / Е.В. Авдеева, СибГТУ, 2007. – 382 С.
12. Демаков, Ю. П. Динамика производительности и состава древостоев в различных экотопах заповедника «Большая Кокшага» / Ю. П. Демаков, А. В. Исаев // Научные труды государственного природного заповедника «Большая Кокшага». – Йошкар-Ола: МарГУ, 2009. – Вып. 4. – С. 24-67.
13. Романовский, М. Г. Листовой индекс в исследованиях продукционного процесса / М. Г. Романовский // Продукционный процесс и структура лесных биогеоценозов: теория и эксперимент. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2009. – С. 129-160.
14. Демаков, Ю. П. Структура молодняков искусственного происхождения сосны и ели в Марийском ополье и пути ее оптимизации / Ю. П. Демаков, Т. В. Нуреева, А. А. Белоусов // Научный электронный журнал Кубанского аграрного университета. – 2013. – № 93. – С. 1-16.
15. Усольцев, В. А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных и ее приложения / В. А. Усольцев. – Екатеринбург: УрО РАН, 2007. – 637 с.
16. Уткин, А. И. Аллометрические уравнения для фитомассы по данным деревьев сосны, ели, березы и осины в европейской части России / А. И.

Уткин, Д. Г. Замолодчиков, Т. А. Гульбе, Я. И. Гульбе // Лесоведение. – 1996. – № 6. – С. 36-46.

17. Демаков, Ю. П. Распространение и производительность ельников в различных экотопах Республики Марий Эл / Ю. П. Демаков, А. А. Симанова // Научный диалог. Естествознание. Экология. Науки о Земле. – 2013. – № 3 (15). – С. 26-42.

18. Yang L. Tree detection from aerial imagery / Lin Yang // GIS '09 Proceedings of the 17th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems, November 04 – 06. - Seattle, Washington:, 2009. – Pages 131–137.

19. Li Zhengrong. Individual tree crown delineation techniques for vegetation management in power line corridor / Li Zhengrong, Ross F., Zhang // In Proceedings of The 10th International Conference on Digital Image Computing : Techniques and Applications. - Australia : Canberra. - 2008.

20. Guang Deng. Automated Extracting Tree Crown From Quickbird Stand Image / Deng Guang, Li Zengyuan, Wu Honggan [Электронный ресурс] : // Natural Resources Canada. – 2005. – Режим доступа: <https://cfs.nrcan.gc.ca/publications?id=25262>

21. Leckie D.G. Automated tree recognition in old growth conifer stands with high resolution digital imagery / D.G. Leckie, F.A. Gougeon, S. Tinis // Remote Sensing Environ. – 2005; – № 94. –С. 311–326.

22. Brovkina Olga. Unmanned aerial vehicles (UAV) for assessment of qualitative classification of Norway spruce in temperate forest stands / Olga Brovkina, Emil Cienciala, Peter Surový // Geo-spatial Information Science. – №5 . – 2018. – 20 С.

23. Erikson M. Comparison of three individual tree crown detection methods / Mats Erikson, Kenneth Olofsson // *International Journal of Remote Sensing*. – 2005. – №32. – С. 3625-3647
24. Masato Katoh. Improving the Precision of Tree Counting by Combining Tree Detection with Crown Delineation and Classification on Homogeneity Guided Smoothed High Resolution (50 cm) Multispectral Airborne Digital Data / Katoh Masato, François A. Gougeon // *Remote Sensing*. – 2012. – №4. – С. 4, 1411-1424.
25. Баранчиков Ю.Н. Фенологическая приуроченность этапов морфогенеза вегетативных почек лиственницы сибирской как фактор динамики популяций галлицы *Dasineura rozhkovi* Mam. et Nik./ Ю.Н. Барченков // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. – СПб.: СПбГЛТА, 2008. – №. 182. – С. 26-35.
26. Черны Мартин. Применение передовой технологии Field-Map в лесном и садово-парковом хозяйстве / М. Черны, И. Ф. Букша // *Опыт чешско-украинского проекта ТехИнЛес*. Киев: – 2010.
27. Букша И.Ф. Опыт применения полевой ГИС Field-Map в лесоустрой-стве / И.Ф., Букша, М. Черны, М. И. Букша // *Матеріали V міжнародної науково-практичної конференції «Нові технології в геодезії, землевпорядкуванні та природокористуванні» 28-30 жовтня 2010 р., м. Ужгород*, – 2010. – С. 32-36.
28. Mapir Survey2 Camera NDVI : [Электронный ресурс] // Сайт компании Mapir. – 2018. Режим доступа: <https://www.mapir.camera/collections/survey2/products/survey2-camera-ndvi-red-nir>. (Дата обращения: 18.02.2012).
29. Yuneec Typhoon H – Обзор беспилотника : [Электронный ресурс] // Техноблог. -2017. Режим доступа: <https://tehnobzor.ru/gadzhety/yuneec-typhoon-h-obzor-bespilotnika/>. (Дата обращения: 18.05.2018).

30. Гексакоптер Yuneec Typhoon H: профессиональный дрон с простым управлением: [Электронный ресурс] // Geektime. – 2017. Режим доступа: <https://geektimes.ru/company/madrobots/blog/288270/>.

31. Барталев С.А. Классификация некоторых типов сельскохозяйственных посевов в южных регионах России по спутниковым данным MODIS / С.А. Барталев, Е.А. Ляпин, И.А. Нейштадт и другие // Исследование Земли из космоса. – 2006. – № 3. – С. 68 –75.

32. Шуркина А.И. Исследование современного растительного покрова республики Хакасия на основе интеграции спутниковых и наземных данных / А. И. Шуркина, А. П. Шевырногов, А. П. Зоркина // Вестник КрасГАУ, 2007. – №5, – С. 65-71.

33. Barbasiewicz A. The analysis of the accuracy of spatial models using photogrammetric software: Agisoft Photoscan and Pix4D / Adrianna Barbasiewicz, Tadeusz Widerski, Karol Daliga // E3S Web of Conferences 26. – 2018.

34. A Hamid. Calibration of high resolution digital camera based on different photogrammetric methods / A Hamid and A Ahmad // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. –2014.

## Карта пробной площади

40 provenances of larch using the 19 Latin letters (*Larix s. la. gmelini* (Rugr.) Rupr.,  
5 *L. laricina* (DuRoi) Koch, 7 *L. laricina* (DuRoi) Koch, 1 *L. laricina* (DuRoi) Koch,  
*S. la. laricina* (DuRoi) Koch), 1 *L. laricina* (DuRoi) Koch, 1 *L. laricina* (DuRoi) Koch,  
are tested in the experimental base of Institute of Forest "Popovskii bor"  
(Krasnoyarsk forest-steppe). Provenance trial was established in the 1969-1970  
in the area 1.5 ha by 3-4 year old seedlings.

лиственницы в 1969-1970 гг. в ОЭП «Погорельский Бор».

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Перечень мест происхождения лиственницы

Таблица Б.1 - Перечень происхождений лиственницы (выборочно),  
сгруппированных в блоки по видам и административным областям [1]

Административный район, лесхоз	Координаты		Высота над уровнем моря (м)	Сумма температур выше 5°C	Физико-географическая провинция
	с.ш.	в.д.			
Лиственница сибирская					
Красноярский край: Манский	55°10′	93°45′	600-1000	1880	Восточно-Саянская
Хакасия:					
Саралинский	54°50′	89°15′	500-1100	-	Кузнецко-Алтайская » -
Ширинский	54°30′	89°30′	600-800	2015	
Таштыпский	-	-	-	-	
Республика Алтай:					
Верхне-Катунский	50°45′	86°50′	1100-2000	1380	Центральная и Юго-Восточная Алтайские
Чемальский	51°15′	85°35′	900-1500	2330	
Республика Тува:					
Тандинский	51°00′	94°40′	1000-1200	2138	Танну-Ольская
Шагонарский	51°00′	93°00′	1000-1200	1478	Верхне-Енисейская Западно-Саянская
Каа-Хемский	51°10′	95°40′	900-1200	1998	
Туранский	52°50′	94°00′	900-1500	1841	
Республика Бурятия:					
Закаменский	50°25′	104°25′	1000-1300	1853	Хамар-Дабанская »
Джидинский	50°40′	104°35′	800-1500	1920	
Иркутская область:					
Усть-Ордынский	53°10′	105°30′	700-1000	1710	Ангаро-Ленская Приангарская
Шестаковский	56°30′	104°00′	350-700	1704	
Лиственница Гмелина					
Читинская область:					
Тунгокоченский	55°10′	116°45′	800-1100	1664	Витимская
Хилокский	51°20′	110°30′	800-1100	1647	Чикой-Ингодинская
Амурская область:					
Зейский	54°45′	128°55′	300-700	1782	Верхнезейско-Удская Зейско-Буреинская Уруша-Большеневерская
Мазановский	51°45′	128°50′	150-250	2339	
Джелтулакский	54°10′	124°40′	400-700	1868	
Лиственница Сукачева					
Челябинская область:					
Миасский	55°50′	60°50′	-	1776	Исетская
Лиственница японская					
Сахалин:					
Томаринский	51°45′	142°50′	100-200	-	-



## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Вегетационные индексы и их применение

Таблица В.1 – Вегетационные индексы и их применение

Аббревиатура	Расшифровка	Формула	Применение
NDVI	Нормализованный относительный вегетационный индекс (Normalized Difference Vegetation Index)	$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$	Индекс предназначен для обнаружения и оценки интенсивности вегетации растений.
EVI	Усовершенствованный вегетационный индекс (Enhanced Vegetation Index)	$EVI = (NIR - Red) / (NIR + C1 * Red - C2 * BLUE + L) * (1 + L)$	позволяет оценивать состояние растений, как в условиях густого растительного покрова, так и в условиях разреженной растительности
ENDVI	Улучшенный NDVI	$((NIR + GREEN) - (2 * BLUE)) / ((NIR + GREEN) - (2 * BLUE))$	Применяется для экосистем с большим объемом биомассы .
DVI	Difference Vegetation Index / Разностный вегетационный индекс	$DVI = NIR - Red$	общее представление о состоянии растительности, при съемке модифицированными камерами
SAVI	индекс с поправкой на «почвенную линию» (Soil-adjusted vegetation index)	$SAVI = 1.5 * (NIR - Red) / (NIR + Red + 0.5)$	Основан на NDVI, но с подавлением эффектов отражения почвы. Рекомендован к использованию в районах с относительно редкой растительностью на фоне почвы.

## Продолжение приложения В

Аббревиатура	Расшифровка	Формула	Применение
MCARI /OSAVI	Индекс хлорофилла - отношение MCARI (Modified chlorophyll absorption ratio index) к OSAVI (Optimized Soil Adjusted Vegetation Index)	$MCARI/OSAVI[670, 800]=\frac{[(R_{700}-R_{670})-0,2(R_{700}-R_{550})](R_{700}/R_{670})}{(1+0,16)(R_{800}-R_{670})/(R_{800}+R_{670}+0,16)}$	Используется при оценке содержания хлорофилла а и b в листьях растений. Преимущество индекса - минимизация влияния подстилающей не вегетирующей поверхности на значение индекса.
NDWI	Нормализованный разностный водный индекс / Normalized difference Water index	$NDWI = (GREEN - NIR)/(GREEN + NIR)$	Для оценка неоднородности степени увлажнения растительности и почв по данным ДЗЗ у которых отсутствует средний инфракрасный канал.
NR	Нормализованный красный / Normalised Red	$Red / (NIR + Red + Green)$	
MSR	Модифицированное простое соотношение (Modified Simple Ratio)	$MSR = ((NIR/Red)-1)/(\sqrt{\frac{NIR}{Red}} + 1)$	Усовершенствованная версия индекса Simple Ratio (RDVI) – повышена чувствительность к биофизическим параметрам растительности.
SIPI	Индекс нечувствительности структуры пигмента (Structure Insensitive Pigment Index)	$SIPI=(R_{800} - R_{445}) / (R_{800} - R_{680})$	Этот показатель предназначен для максимизации чувствительности индекса к соотношению объемных каротиноидов к хлорофиллу.